

**EMERSON JOAQUIM XAVIER**

**INFLUÊNCIA DAS ASSIMETRIAS GEOMÉTRICAS  
NA COROA DO ESTATOR NO DESEMPENHO DE  
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

**FLORIANÓPOLIS  
2008**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**INFLUÊNCIA DAS ASSIMETRIAS GEOMÉTRICAS  
NA COROA DO ESTATOR NO DESEMPENHO DE  
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.


**EMERSON JOAQUIM XAVIER**

Florianópolis, outubro de 2008.

# INFLUÊNCIA DAS ASSIMETRIAS GEOMETRICAS NA COROA DO ESTATOR NO DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

EMERSON JOAQUIM XAVIER

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade federal de Santa Catarina.’



Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.  
Orientador



Profª. Kátia Campos de Almeida, Dra.  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.  
Presidente



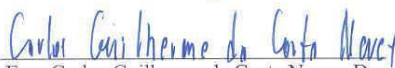
Prof. Renato Carlson, Dr.  
Co-Orientador



Prof. Nelson Jhos Batistela, Dr.



Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.



Eng. Carlos Guilherme da Costa Neves, Dr.

## **AGRADECIMENTOS**

À WEG pela oportunidade e por disponibilizar algumas horas no período de dois anos e meio para cursar as disciplinas do curso e pelo investimento na qualificação de seus engenheiros.

Aos professores da UFSC, em especial aos do GRUCAD, pela disponibilidade de se deslocarem à Jaraguá do Sul, e pela dedicação e interesse nas disciplinas ministradas.

Ao meu orientador, professor Mauricio Valencia Ferreira da Luz, pelo incentivo e disposição no auxílio ao trabalho da dissertação.

Aos colegas e amigos da WEG, que assistiram as disciplinas comigo e me auxiliaram no trabalho de dissertação: Adilson Carlos Machado, Alexandre Postól Sobrinho, Aline Evelin Custodio, Briam Cavalca Bork, Celia Miwa Siguimoto, Eduardo Duarte, Hideraldo Luis Vasconcelos dos Santos, Hilton Penha Silva, Hugo Gustavo Gomez Mello, Jacques Roberth Ruthes, Marcelo Verardi, Mario Célio Contin, Paulo Ricardo Schmitt, Rubens Bernardes de Carvalho, Sebastião Lauro Nau, Siegfried Kreutzfeld, Waldiberto de Lima Pires e Walmor Von Eggert.

À minha esposa Kelcia, pelo incentivo e confiança nas horas que eu mais precisei.

E, a alguém que me fortalece e me dá alegria, Deus .



Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

## **INFLUÊNCIA DAS ASSIMETRIAS GEOMETRICAS NA COROA DO ESTATOR NO DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

**Emerson Joaquim Xavier**

Outubro/2008

Orientador: Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Co-orientador: Prof. Renato Carlson, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos

Palavras-chave: assimetria geométrica, estator, motor de indução, desempenho, custo.

Número de Páginas: 83

**RESUMO:** Este trabalho apresenta um estudo das assimetrias geométricas no estampo da coroa do estator de motores de indução trifásicos. Assimetria esta, conhecida na linguagem técnica como corte econômico. Para o estudo utilizou-se três motores de indução trifásicos de 20cv, VI pólos, carcaça IEC 160L, 220/380 V, 60 Hz, linha Standard. Os três estatores apresentavam coroas com diferentes formas geométricas, (1) coroa convencional redonda, (2) coroa com corte econômico na largura da tira e (3) coroa com corte econômico na largura da tira e avanço do passo. Utilizou-se o programa de cálculo M2E, onde se obteve os valores de desempenho do motor para os três casos. Para a modelagem eletromagnética do motor com as três diferentes coroas, utilizou-se o sistema EFCAD, que realiza simulações através do método de elementos finitos para o cálculo eletromagnético. Os resultados apresentados nos ensaios, cálculos analíticos e simulações apresentaram diferenças insignificantes nos valores de desempenho, nas induções na coroa do estator e nas perdas no ferro. Ficou evidente a viabilidade do corte econômico para as carcaças IEC 132 a 200, obtendo como vantagem a economia e melhor aproveitamento das chapas de aço e como desvantagem o investimento na reforma ou fabricação de novos estampos e outros ferramentais.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for  
the degree of Master in Electrical Engineering

## **INFLUENCE OF THE GEOMETRICS ASYMMETRIAS IN THE YOKE OF THE STATOR IN THE PERFORMANCE OF THREE-PHASE MOTORS OF INDUCTION**

**Emerson Joaquim Xavier**

October/2008

Advisor: Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.

Co-advisor: Prof. Renato Carlson, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices

Keywords: geometric asymmetry, stator, induction motor, performance, cost.

Number of Pages: 83

**ABSTRACT:** This work presents a study of geometric asymmetries in stator yoke of three-phase induction motors. Such asymmetry is, known in the technical language as “economic cut”. For this study, one has used three Standard 20cv, VI poles, IEC 160L, 220/380 V, 60 Hz, three-phase induction motors. The three stators have different yoke geometries, (1) round traditional yoke, (2) yoke with “economic cut” in the width of the lamination length and (3) yoke with “economic cut” in the width of the lamination length and in the step advance. The Calculations were made with M2E, were values of performance of the motor were calculated for the three cases. For the electromagnetic modeling of the motor with the three different geometries one has used the EFCAD system, which uses the finite element technique. Values of in inductions in the stator yoke and iron losses measured and calculated with both, analytic and Finite Element method presented small deviations. The feasibility of the economic cut for frames IEC 132 to 200 is clear: using fewer amount of iron, without compromising performance, with only one drawback which is the costs involved in the re-project of the stamping tool.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>SIMBOLOGIA.....</b>	<b>xii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
<b>3 ANÁLISE DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....</b>	<b>9</b>
3.1 Estampagem das chapas .....	9
3.2 Grampeamento para sustentação do pacote de chapas do estator .....	10
3.3 Inserção e amarração das bobinas nas ranhuras do estator.....	10
3.4 Prensagem do pacote de chapas do estator na carcaça .....	11
<b>4 TIPOS DE ASSIMETRIAS.....</b>	<b>14</b>
4.1 Corte Convencional .....	14
4.2 Corte Convencional Econômico .....	15
4.3 Corte Semi-concêntrico .....	15
4.4 Corte Concêntrico .....	16
4.5 Assimetrias Utilizadas .....	19
4.5.1 Corte Convencional Econômico - Reforma do estampo .....	19
4.5.2 Corte Convencional Econômico – Nova ferramenta .....	20
<b>5 CÁLCULO ANALÍTICO .....</b>	<b>22</b>
5.1 Fluxo magnético por pólo do motor .....	22
5.2 Indução na coroa do estator .....	23
5.3 Corrente magnetizante.....	24
5.4 Perdas no ferro .....	26
5.4.1 Perdas no ferro por histerese.....	27
5.4.2 Perdas no ferro por correntes parasitas (Foucault) .....	30
5.4.3 Perdas totais no ferro .....	33

<b>6 CÁLCULO ELETROMAGNÉTICO ANALÍTICO .....</b>	<b>34</b>
<b>7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL USANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS .....</b>	<b>38</b>
7.1 Desenho da estrutura da chapa .....	38
7.2 Simulação Estática .....	42
7.3 Análise da Simulação Estática .....	43
<b>8 ANÁLISE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>50</b>
8.1 Ensaios de tipo .....	50
8.1.1 Resultado dos ensaios de tipo .....	52
8.2 Ensaios de vibração .....	59
8.2.1 Resultados dos ensaios de vibração em base elástica .....	59
8.3 Ensaios de ruído .....	61
8.3.1 Resultados dos ensaios de ruído .....	62
8.4 Análise geral dos resultados .....	62
<b>9 CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
9.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	64
<b>ANEXO 1 – ENSAIOS DE TIPO .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO 2 – ENSAIOS DE RUÍDO .....</b>	<b>75</b>
<b>10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>82</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Seção de material sem corte econômico .....	4
Figura 2.2 – Seção de material com corte econômico na largura da tira (reforma do estampo).....	4
Figura 2.3 – Seção de material com corte econômico na largura da tira e avanço do passo (estampo novo).....	4
Figura 2.4 – Chapa do estator e rotor .....	7
Figura 2.5 – Placa de identificação .....	8
Figura 3.1 – Chapa com seis grampos.....	10
Figura 3.2 – Chapa com oito grampos .....	10
Figura 3.3 – Base giratória motores pequenos .....	11
Figura 3.4 – Base giratória motores grandes .....	11
Figura 3.5 – Motor da linha IP23 – Aberto .....	13
Figura 3.6 – Contato entre corte econômico e carcaça.....	13
Figura 4.1 – Corte Convencional .....	14
Figura 4.2 – Corte Convencional Econômico.....	15
Figura 4.3 – Corte Semi-concêntrico .....	16
Figura 4.4 – Corte Concêntrico .....	16
Figura 4.5 – Prensa enclausurada .....	17
Figura 4.6 – Ferramenta de estampo .....	17
Figura 4.7 – Bobina de aço “mãe” .....	17
Figura 4.8 – Bobina de aço cortada alimentando a prensa .....	17
Figura 4.9 – Chapa do estator .....	18
Figura 4.10 – Chapa do rotor .....	18
Figura 4.11 – Chapa do estator sem corte econômico.....	18
Figura 4.12 – Chapa do estator com corte econômico .....	18
Figura 4.13 – Pacote do estator sem corte econômico .....	18
Figura 4.14 – Pacote do estator com corte econômico .....	18
Figura 4.15 – Rotor completo .....	19
Figura 4.16 – Pacote de chapas do rotor.....	19
Figura 4.17 – Modificação do estampo de Corte Convencional.....	20

Figura 4.18 – Estampo reformado para o corte convencional econômico na largura da tira .....	20
Figura 4.19 – Corte Convencional Econômico .....	21
Figura 5.1 – Estator .....	24
Figura 5.2 – Ciclo de histerese .....	27
Figura 5.3 – Chapa laminada. ....	30
Figura 6.1 – Projeto (CC) - Chapa convencional sem corte econômico .....	34
Figura 6.2 – Projeto (CET) - Chapa com corte econômico na tira de 2 mm .....	34
Figura 6.3 – Projeto (CETP) - Chapa com corte econômico na tira e avanço de passo de 2 mm .....	34
Figura 6.4 – Especificação Eletromecânica .....	35
Figura 7.1 – Orientação das fontes de corrente .....	39
Figura 7.2 – Esquema de bobinagem .....	39
Figura 7.3 – Chapa sem corte econômico discretizada .....	40
Figura 7.4 – Curva 1: Aço 1006 com tratamento .....	41
Figura 7.5 – Curva 2: Aço 1006 sem tratamento .....	41
Figura 7.6 – Forma de onda aplicada ao motor .....	42
Figura 7.7 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa convencional sem corte econômico (CC): condição A .....	43
Figura 7.8 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa convencional sem corte econômico (CC): condição B .....	44
Figura 7.9 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa com corte econômico na largura da tira (CET): condição A .....	45
Figura 7.10 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa com corte econômico na largura da tira (CET): condição B .....	46
Figura 7.11 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa com corte econômico na largura da tira e avanço do passo (CETP): condição A ....	47
Figura 7.12 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa com corte econômico na largura da tira e avanço do passo (CETP): condição B ....	48
Figura 8.1 – Motor (CC) .....	50
Figura 8.2 – Motor (CET) e Motor (CETP) .....	50
Figura 8.3 – Dinamômetro .....	51
Figura 8.4 – Acoplamento .....	51

Figura 8.5 – Valores da Corrente a vazio - $I_o[A]$ .....	54
Figura 8.6 – Valores da Corrente nominal - $I_a[A]$ .....	54
Figura 8.7 – Valores das Perdas no ferro - $P_{fe}[W]$ .....	55
Figura 8.8 – Valores das Perdas Joule no estator - $P_n[W]$ .....	55
Figura 8.9 – Comparativo dos valores de Rendimento - $\eta\%$ .....	56
Figura 8.10 – Valores de $\cos \phi$ .....	56
Figura 8.11 – Valores de Conjugado de partida por Conjugado nominal - $C_p/C_n$ .....	57
Figura 8.12 – Valores de Conjugado máximo por Conjugado nominal - $C_m/C_n$ .....	57
Figura 8.13 – Valores de Corrente de partida por Corrente nominal - $I_p/I_n$ .....	58
Figura 8.14 – Valores de $\Delta T$ da bobina [ $^{\circ}C$ ] .....	58
Figura 8.15 – Ensaio de vibração em base elástica com medição no ponto 2 .....	59
Figura 8.16 – Ensaio de vibração em base elástica com medição no ponto 5 .....	59
Figura 8.17 – Motor no interior da câmara semi-aneecóica .....	61

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1 – Informações sobre as chapas .....</b>	<b>5</b>
<b>Tabela 2.2 – Economia obtida com o corte econômico .....</b>	<b>6</b>
<b>Tabela 2.3 – Relação <math>h_{cl}/R_{cm1}</math> .....</b>	<b>7</b>
<b>Tabela 3.1 – Coeficiente de segurança .....</b>	<b>12</b>
<b>Tabela 6.1 – Resultados dos cálculos no M2E .....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 6.2 – Cálculo Eletromagnético Analítico no M2E dos Valores das Induções ..</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 7.1 – Características dos Materiais .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 7.2 – Simulação no EFCAD dos Valores Máximos das Induções .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 8.1 – Comparação dos valores de ensaios do motor (CC).....</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 8.2 – Comparação dos valores de ensaios do motor (CET) .....</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 8.3 – Comparação dos valores de ensaios do motor (CETP) .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 8.4 – Comparação dos valores de ensaios do motor (CC), motor (CET) e Motor (CETP) .....</b>	<b>53</b>
<b>Tabela 8.5 – Análise de severidade de vibração – IEC 60034 -14.....</b>	<b>60</b>
<b>Tabela 8.6 – Norma IEC 60034 -100.....</b>	<b>60</b>
<b>Tabela 8.7 – Valores dos Níveis de Potência Sonora - ISO 1680 .....</b>	<b>62</b>



## SIMBOLOGIA

<b>Símbolo</b>	<b>Denominação</b>	<b>Unidade</b>
A	Número de caminhos paralelos de corrente por fase	
Ah	Área interior do ciclo de histerese	[mm <sup>2</sup> ]
B	Indução magnética	[T]
B <sub>co1</sub>	Indução na coroa do estator	[T]
B <sub>co2</sub>	Indução na coroa do rotor	[T]
B <sub>de1</sub>	Indução no dente do estator	[T]
B <sub>de2</sub>	Indução do dente do rotor	[T]
B <sub>ef</sub>	Indução do entreferro	[T]
B <sub>m</sub>	Indução máxima	[T]
C <sub>máx</sub>	Conjugado máximo	[kgf.m]
C <sub>n</sub>	Conjugado nominal	[kgf.m]
Cos $\phi$	Fator de potência	
C <sub>p</sub>	Conjugado de partida	[kgf.m]
D	Diâmetro no centro do entreferro	[mm]
D <sub>e1</sub>	Diâmetro externo do estator	[mm]
D <sub>i1</sub>	Diâmetro interno do estator	[mm]
E	Campo elétrico	[V/mm]
E <sub>c</sub>	Energia líquida consumida por ciclo	[Joule]
f	Frequência da rede de alimentação	[Hz]
f.e.m.	Força eletromotriz	[Ae]
f.m.m.	Força magneto-motriz	[Ae]
f <sub>w1</sub>	Fator de enrolamento	
h <sub>cl</sub>	Altura da coroa do estator	[mm]
h <sub>rl</sub>	Altura da ranhura do estator	[mm]
H	Campo magnético	[A/m]
i <sub>1</sub>	Rigidez da coroa do estator	
I <sub>mag</sub>	Corrente magnetizante	[A]
I <sub>0</sub>	Corrente a vazio	[A]
I <sub>n</sub>	Corrente nominal	[A]
I <sub>p</sub>	Corrente de partida	[A]
K <sub>e</sub>	Coeficiente das perdas por correntes parasitas	

<b>Símbolo</b>	<b>Denominação</b>	<b>Unidade</b>
$K_{ef}$	Fator de empilhamento do pacote do estator	
$K_h$	Coeficiente das perdas por histerese (Foucault)	
$l_{mag}$	Comprimento do campo magnético	[m]
$L$	Comprimento do circuito magnético de um núcleo de ferro	[m]
$m$	Número de fases do enrolamento	
$M$	Massa do núcleo	[kg]
$N$	Número efetivo de espiras em série por fase	
$N_{ph}$	Número de espiras em série por fase	
$p_e$	Perdas por correntes parasitas	[W]
$p_h$	Perdas por histerese	[W]
$P_{fe}$	Perdas no ferro	[W]
$P_{ha}$	Perdas por harmônicas	[W]
$P_{j1}$	Perdas Joule no estator	[W]
$P_{j2}$	Perdas Joule no rotor	[W]
$P_s$	Perdas suplementares	[W]
$Q_e$	Constante de proporcionalidade característica do material do núcleo das perdas por correntes parasitas	
$Q_h$	Constante de proporcionalidade característica do material do núcleo das perdas por histerese (Foucault)	
$r$	Relação $h_{c1}/R_{cm1}$	
$R_{cm1}$	Raio médio da coroa do estator	[m]
$R_1$	Resistência do enrolamento antes do ensaio	[ $\Omega$ ]
$R_2$	Resistência do enrolamento no fim do ensaio	[ $\Omega$ ]
$s_1$	Número de bobinas por pólo e por fase	
$S_{Fe}$	Seção transversal de um núcleo de ferro	[m]
$T_a$	Temperatura do meio refrigerante no fim do ensaio	[°C]
$T_1$	Temperatura do enrolamento antes do ensaio	[°C]
$T_2$	Temperatura do enrolamento no fim do ensaio	[°C]
$U$	Tensão de fase instantânea	[V]
$U_{ef}$	Tensão eficaz por fase	[V]
$Z_1$	Número de espiras por bobina	
$\ddot{a}$	Densidade do material do núcleo	[ kg/m <sup>3</sup> ]
$\ddot{a}'$	Comprimento do entreferro	[m]
$\Delta T$	Elevação de temperatura	[°C]

<b>Símbolo</b>	<b>Denominação</b>	<b>Unidade</b>
$\Phi$	Fluxo magnético	[Wb]
$\Phi_{\text{máx}}$	Fluxo magnético girante resultante	[Wb]
$\mu$	Permeabilidade magnética	[H/m]
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do ar	[H/m]
$\alpha$	Coefficiente de Steinmetz	
$\eta$	Rendimento	[%]
$\rho$	Resistividade do material	[ $\Omega$ .m]

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização do corte econômico nas chapas dos estatores dos motores elétricos tem por objetivo a redução do consumo de aço elétrico no processo de fabricação, sem que isso afete o desempenho e a qualidade do produto.

Em motores de indução monofásicos é comum a utilização desta técnica, sendo a redução do diâmetro externo do estator feita de maneira acentuada e ficando com formato quase quadrado. Isto é possível, pois o comportamento pulsante do campo magnético nos motores monofásicos permite esta configuração.

Sabendo-se das vantagens do uso do corte econômico nas chapas dos motores monofásicos e tendo em vista o grande volume de vendas de motores de indução trifásicos de baixa tensão que ainda utilizam as chapas normais sem corte econômico, uma análise mais detalhada do uso deste corte se faz necessária nos motores de indução trifásicos. Desta forma, se estudará a possibilidade de aplicação, as supostas vantagens e desvantagens, a viabilidade econômica, as influências no desempenho do motor e as alterações no processo de fabricação.

Nos motores de indução trifásicos deve-se ter cautela na redução do diâmetro externo do estator, para que isso não cause um estrangulamento à passagem do fluxo magnético e prejudique o desempenho dos motores. Para os motores de indução trifásicos é importante que a coroa do estator seja o mais uniforme possível em função do comportamento girante do campo magnético.

Com a otimização do processo de estampagem, a economia obtida com o corte econômico deve-se principalmente a redução do material que atualmente vira refugo e ao melhor aproveitamento dos rolos de chapas de aço. Devido ao processo de estampagem, para lâminas redondas com corte convencional, a largura da tira deve ser maior do que o diâmetro da chapa para evitar interferência entre uma peça e outra. Entretanto para as lâminas com corte econômico a largura da tira apresenta a mesma dimensão da chapa (Figuras 2.1 a 2.3). Os valores da largura da tira para estampos estão definidos na norma TBG-0338E [1] da WEG.

Por se tratar de um assunto diretamente relacionado à questão de tecnologia, o qual depende exclusivamente de fabricantes de motores, não se encontrou referência a este assunto em nenhuma das bibliografias pesquisadas, sabendo-se apenas que alguns

concorrentes utilizam o corte econômico no processo de estampagem das chapas de seus motores.

Utilizando alguns programas de cálculo e simulações, verificou-se o comportamento eletromagnético que ocorre devido às diferentes configurações de corte convencional e econômico, pesquisando suas alterações e as leis que regem seu comportamento, com o objetivo de encontrar explicações técnicas que descrevam esses fenômenos e justifiquem sua aplicação.

O estudo para verificar a aplicabilidade do uso do corte econômico, foi realizado em três motores de indução trifásicos de 20cv, VI pólos, carcaça IEC 160L, 60 Hz, linha Standard.

O trabalho é dividido em capítulos. O capítulo 1 consiste de uma introdução sobre o corte econômico nas chapas dos estatores dos motores elétricos, assim como a importância e objetivos do trabalho. O capítulo 2 faz o levantamento das informações sobre os motores, o cálculo da economia gerada com o corte econômico e a escolha do motor para análise. O capítulo 3 apresenta a análise dos processos e os problemas de fabricação dos protótipos dos motores com corte econômico. O capítulo 4 mostra os tipos de assimetrias dos estampos e as que serão utilizadas para a implantação do corte econômico. O capítulo 5 apresenta os cálculos analíticos do fluxo magnético por pólo do motor, da indução magnética na coroa do estator, da corrente magnetizante e das perdas no ferro. O capítulo 6 apresenta o cálculo eletromagnético analítico dos parâmetros de desempenho do motor através do programa M2E [2]. O capítulo 7 mostra a simulação computacional estática usando o método de elementos finitos através do software EFCAD [3]. O capítulo 8 apresenta a análise experimental, os resultados de ensaios, comparativas de ensaios e gráficos. Por fim, o capítulo 9 apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Conhecendo-se o uso do corte econômico em motores de indução monofásicos e, sabendo-se do melhor aproveitamento das chapas de aço devido à utilização deste corte, foi realizado um levantamento de quais motores atualmente produzidos utilizam o corte econômico. As carcaças abordadas em todo o trabalho de dissertação são padrão IEC e os valores numéricos citados para as carcaças são referentes à altura em milímetros do plano da base do motor até o centro da ponta do seu eixo.

Constatou-se que atualmente a empresa utiliza as chapas com corte econômico na maioria das linhas de motores monofásicos e nos motores trifásicos até a carcaça 112, com exceção de algumas polaridades. Além disso, tem-se observado que alguns concorrentes utilizam o corte econômico em chapas de motores maiores que a carcaça 112, assim decidiu-se elaborar um estudo para implantação do corte econômico nas chapas das carcaças 132 da fábrica IV e 160, 180 e 200 da fábrica VI.

Foram consideradas duas possibilidades para a implantação do corte econômico: (1) a substituição dos estampos, que implica em um investimento inicial maior, e (2) a reforma dos estampos atuais, que necessita de investimentos menores.

A primeira alternativa permite a implantação do corte econômico tanto na largura da tira quanto no avanço do passo, resultando na maior economia possível; enquanto que na segunda alternativa não é possível implantar o corte econômico no avanço do passo, somente na largura da tira, obtendo-se aproximadamente 70% da economia da primeira alternativa.

As Figuras 2.1 a 2.3 ilustram as seções das chapas sem e com corte econômico. Observa-se que o material ao redor do círculo vira sucata, sendo perceptível que nas chapas com o corte econômico a redução de sucata é maior que a redução de material útil (círculo).

Para o levantamento da economia proporcionada pelo corte econômico, foram apuradas as informações das chapas de cada carcaça: dimensões, massa e redução de material com o corte econômico. Todos estes valores são apresentados na **Tabela 2.1**.

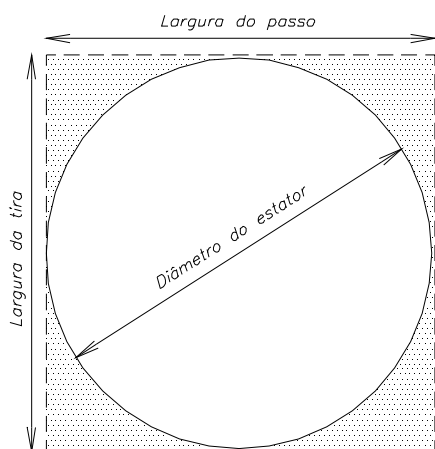


Figura 2.1 – Seção de material sem corte econômico

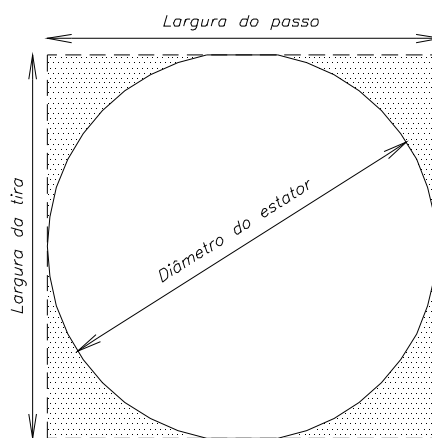


Figura 2.2 – Seção de material com corte econômico na largura da tira (reforma do estampo)

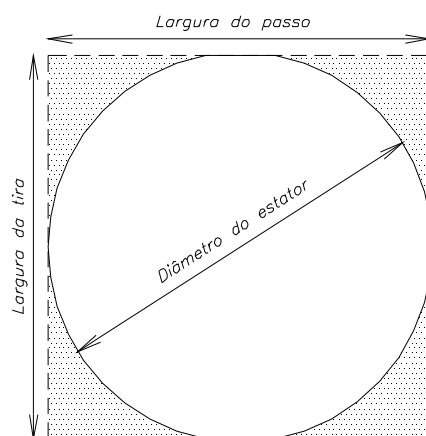


Figura 2.3 – Seção de material com corte econômico na largura da tira e avanço do passo (estampo novo)

Verificou-se qual a melhor dimensão do corte econômico a ser utilizada, tendo como base as dimensões dos cortes econômicos definidos em projetos das chapas dos motores trifásicos das carcaças 63 a 112, que são de 1 e 1,5 mm em cada lateral da tira e 1 e 1,5 mm no avanço do passo. Procurando garantir o processo de estampagem, definiu-se como corte econômico de forma proporcional o valor de 2 mm em cada lateral da tira e 2 mm no avanço do passo para as carcaças 132 a 200, totalizando uma economia real de 8 mm na largura da tira e 4 mm no avanço do passo em relação ao corte convencional.

**Tabela 2.1 – Informações sobre as chapas**

<b>Carcaça</b>			<b>132</b>	<b>160</b>	<b>180</b>	<b>200</b>
Diâmetro externo		(mm)	220	240	283	315
Corte Convencional	Largura da Tira	(mm)	225	244	288	320
	Largura do Passo	(mm)	222	242	285	317
	Seção unitária	(mm <sup>2</sup> )	49950	59048	82080	101440
	Massa unitária (1)	(g)	235,26	278,12	386,60	477,78
Redução na Tira e Avanço do Passo		(mm)	2,0	2,0	2,0	2,0
Corte Econômico na Tira (Reforma do Estampo)	Largura da Tira	(mm)	216	236	279	311
	Largura do Passo	(mm)	222	242	285	317
	Seção unitária	(mm <sup>2</sup> )	47952	57112	79515	98587
	Massa unitária (2)	(g)	225,85	269,00	374,52	464,34
	• Massa (1)-(2)	(g)	9,41	9,12	12,08	13,44
	<b>Redução</b>	<b>(%)</b>	<b>4,0</b>	<b>3,3</b>	<b>3,1</b>	<b>2,8</b>
Corte Econômico na Tira e Avanço do Passo (Estampo novo)	Largura da Tira	(mm)	216	236	279	311
	Largura do Passo	(mm)	218	238	281	313
	Seção unitária	(mm <sup>2</sup> )	47088	56168	78399	97343
	Massa unitária (3)	(g)	221,78	264,55	369,26	458,49
	• Massa (1)-(3)	(g)	13,48	13,56	17,34	19,30
	<b>Redução</b>	<b>(%)</b>	<b>5,7</b>	<b>4,9</b>	<b>4,5</b>	<b>4,0</b>

Para o cálculo da massa foi considerada a espessura da chapa igual a 0,6 mm e densidade do aço igual a 7850 kg/m<sup>3</sup>.

A **Tabela 2.2** apresenta a economia obtida com as duas alternativas de implantação do corte econômico. Os valores de demanda são referentes à média mensal do segundo semestre de 2007. Considerando a implantação em todas as chapas das carcaças 132 a 200, a economia anual é de 1,6 mil toneladas de aço para o corte econômico na tira e 2,3 mil toneladas de aço para o corte econômico na tira e avanço do passo. A economia financeira é diretamente proporcional a economia em massa de chapa.



**Tabela 2.2 – Economia obtida com o corte econômico**

Carcaça			TOTAL	132	160	180	200
Demanda mensal média	(unidades)		13 026 500	5 301 000	4 140 000	1 703 500	1 882 000
	(kg)		3,96 x 10 <sup>6</sup>	1,25 x 10 <sup>6</sup>	1,15 x 10 <sup>6</sup>	0,66 x 10 <sup>6</sup>	0,90 x 10 <sup>6</sup>
Corte Econômico na Tira (Reforma do Estampo)	Economia (%)		<b>3,4</b>	4,0	3,3	3,1	2,8
	Mensal	(kg)	133 506	49 885	37 751	20 580	25 290
	Anual	(kg)	<b>1 602 074</b>	598 626	453 010	246 963	303 475
Corte Econômico na Tira e Avanço do Passo (Estampo Novo)	Economia (%)		<b>4,9</b>	5,7	4,9	4,5	4,0
	Mensal	(kg)	193 467	71 458	56 158	29 534	36 317
	Anual	(kg)	<b>2 321 604</b>	857 491	673 899	354 413	435 801

Dando continuidade ao estudo para implantação do corte econômico, com a necessidade da verificação experimental da influência do corte econômico sobre o desempenho dos motores de indução trifásicos da carcaça 132 a 200, foi escolhido um motor para os ensaios em laboratório.

Conforme [4] e [5], a equação (2.1) representa a rigidez da coroa do estator:

$$i_1 = \frac{h_{c1}}{2\sqrt{3}R_{cm1}} \quad (2.1)$$

onde:

$h_{c1}$  é a altura da coroa do estator;

$R_{cm1}$  é o raio médio da coroa do estator.

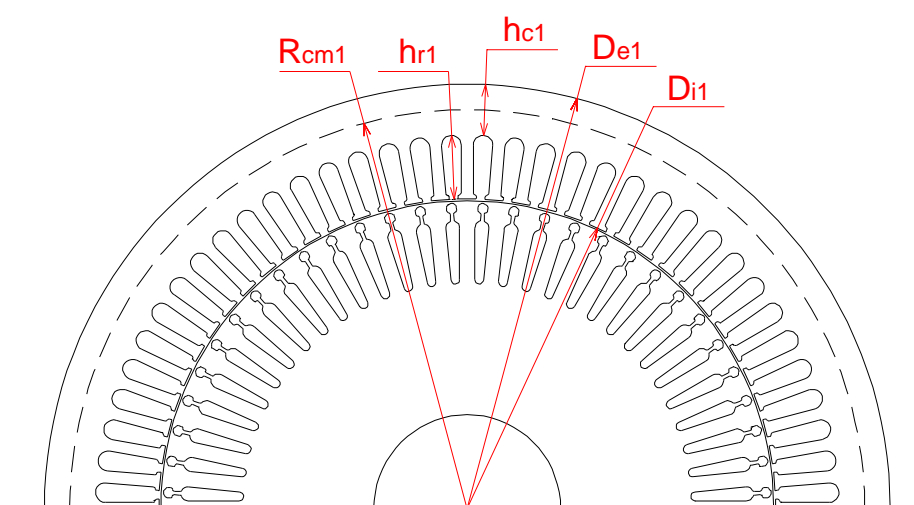
Os motores com maior número de pólos apresentam coroas mais estreitas, com o objetivo de reduzir a quantidade de material ferromagnético, já que o fluxo magnético que as atravessa é menor do que o das coroas com motores de menor polaridade. Portanto, as coroas dos motores de mais alta polaridade ficam sujeitas a maiores deformações.

A **Tabela 2.3** mostra a relação entre a altura da coroa e o raio médio da coroa ( $h_{c1}/R_{cm1}$ ) dos estatores das carcaças em estudo.

**Tabela 2.3 – Relação  $h_{c1}/R_{cm1}$**

<b>Carcaça</b>	<b>132</b>	<b>160</b>	<b>180</b>	<b>200</b>
<b>Polaridade</b>	<b>VIII</b>	<b>VI/VIII</b>	<b>VI/VIII</b>	<b>VI/VIII</b>
Diâmetro externo do estator – $D_{e1}$ [mm]	220	240	283	315
Diâmetro interno do estator – $D_{i1}$ [mm]	160	175	206	220
Altura da ranhura do estator – $h_{r1}$ [mm]	17,300	18,055	20,588	23,760
Altura da coroa do estator – $h_{c1}$ [mm]	12,700	14,445	17,912	23,740
Raio médio da coroa do estator – $R_{cm1}$ [mm]	103,650	112,778	132,544	145,630
<b>Relação <math>h_{c1}/R_{cm1} - r</math></b>	0,122	0,128	0,135	0,163

A Figura 2.4 mostra essas grandezas geométricas.



**Figura 2.4 – Chapa do estator e rotor**

Diante destas considerações, optou-se por um motor das polaridades mais críticas produzido pela WEG, com as seguintes especificações: motor de indução trifásico de 20 cv, VI pólos, carcaça IEC 160L, 220/380V, 60 Hz, linha Standard. Os dados do motor estão especificados na placa de identificação ilustrada na Figura 2.5.

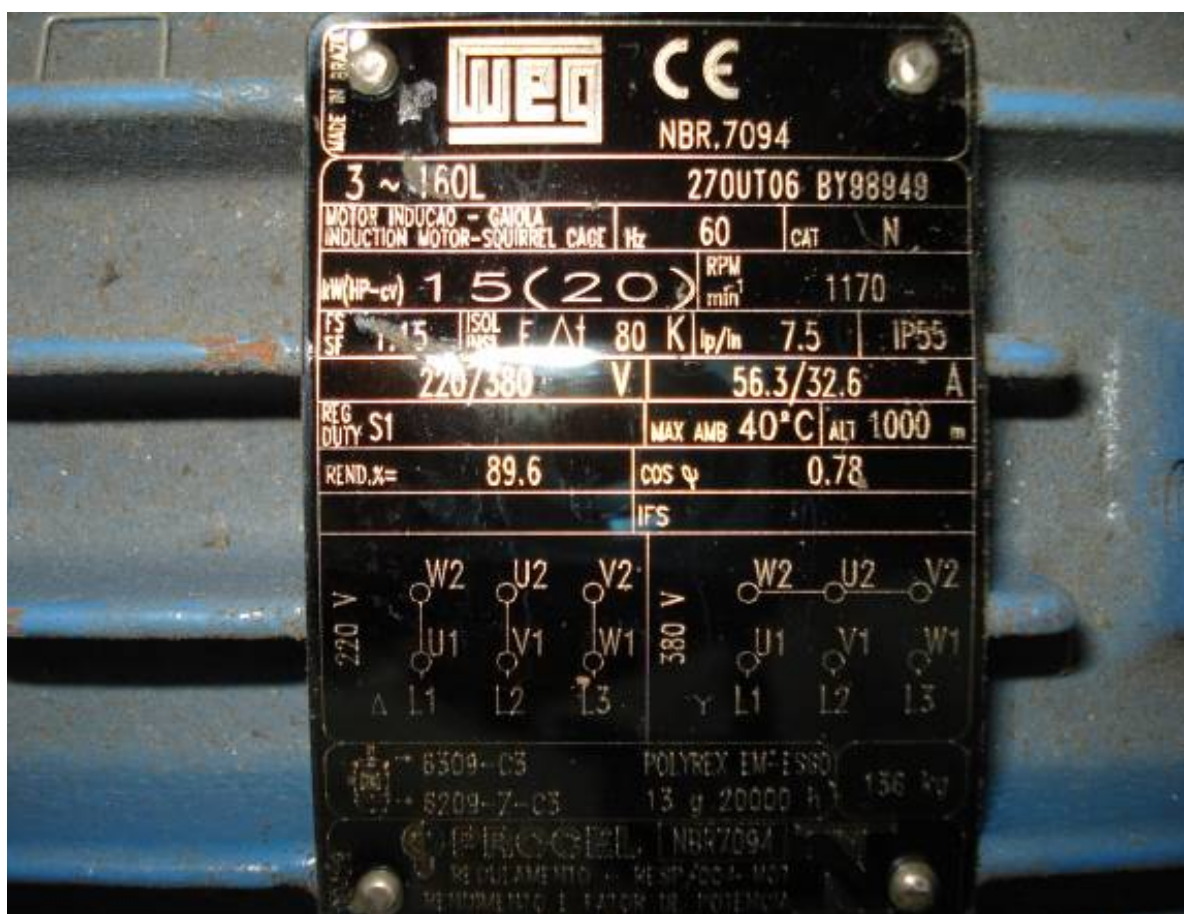


Figura 2.5 – Placa de identificação

### **3 ANÁLISE DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

O estudo de implantação do corte econômico no processo de estampagem foi importante para identificar alguns problemas que afetariam diretamente nos processos de fabricação dos motores de indução trifásicos com a chapa com corte econômico. Estes problemas ficaram mais evidenciados na prática, ou seja, durante a fabricação de alguns protótipos da carcaça 132, 160, 180 e 200.

#### **3.1 Estampagem das chapas**

A dimensão da largura da bobina da chapa de aço a ser estampada é definida no projeto do motor e obtida através do corte de bobinas “mãe”, através de uma ferramenta de corte chamada Sliter. Quando se utiliza o corte econômico, a borda da lâmina é o próprio limite da chapa do estator, o que caracteriza um melhor aproveitamento da bobina.

A excentricidade da chapa é um fator relevante no processo, pois esta poderá provocar o efeito “serra” na montagem do pacote, dificultando assim, a inserção das bobinas na ranhura e a prensagem do pacote de chapas do estator na carcaça. O que poderia solucionar este problema seria o uso de estampo com corte concêntrico (Capítulo 4), utilizado hoje para os motores monofásicos e que garantem os valores de entreferro. Atualmente, o uso desse estampo para os motores de indução trifásicos é inviável devido ao valor da ferramenta que possui maior número de estágios.

Outro problema que se caracteriza no processo de estampagem da chapa com corte econômico é o problema de ovalização da carcaça devido à diminuição da área de contato quando o pacote de chapas do estator é prensado na carcaça.

Além disso, existe a necessidade de se diminuir a velocidade de estampagem das prensas entre um estágio e outro em virtude do tamanho das sobras de chapas (cavacos) resultantes do processo de estampagem. Os cavacos do corte econômico possuem tamanhos menores que os do corte convencional devido ao melhor aproveitamento da tira de chapa. Assim, por ser menores, não saem com tanta facilidade da ferramenta de estampo entre um golpe e outro como na estampagem convencional, podendo danificar a ferramenta, necessitando de mais manutenções. Além disso, estes cavacos podem ficar entre as chapas que saem empilhadas pela tromba da ferramenta de estampagem, ocasionando problemas de compactação e interferência nos pacotes de chapas dos estatores e rotores.

### 3.2 Grampeamento para sustentação do pacote de chapas do estator

Foi constatada a necessidade de alterar o número de furos de grampos (caudas de andorinha) para formação dos pacotes de chapas do estator, visto que atualmente são utilizados seis grampos com espaçamento equidistante. Para implantar o corte econômico é necessário que o número de grampos seja múltiplo de quatro, ou seja, para as chapas das carcaças 132 a 200 foram definidos oito grampos. A posição dos grampos deverá estar situada sobre o dente do estator com o objetivo de não diminuir a área de chapa na região da coroa do estator, o que poderia ocasionar um ponto de saturação da chapa.

A definição de oito grampos implica na fabricação de novas máquinas de grampear para substituição gradual das máquinas existentes. As novas máquinas de grampear serão projetadas para trabalhar com os mesmos diâmetros das máquinas atuais de seis grampos, isto é, com chapas das carcaças 132 a 200 (diâmetros de 220 a 315 mm). As Figuras 3.1 e 3.2 mostram a distribuição dos grampos.

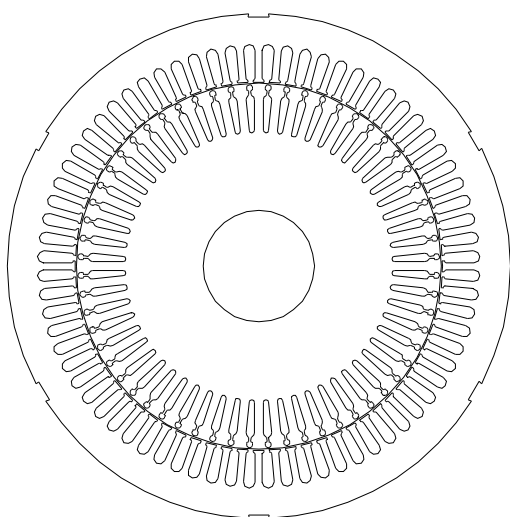


Figura 3.1 – Chapa com seis grampos

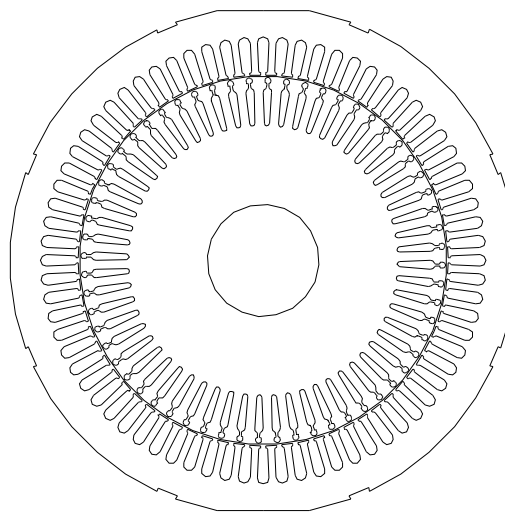


Figura 3.2 – Chapa com oito grampos

### 3.3 Inserção e amarração das bobinas nas ranhuras do estator

A interferência da alteração do número de furos de grampos e a inclusão dos cortes econômicos no processo de bobinagem dos pacotes de chapas foram consideradas para todas as carcaças em estudo.

Durante a fabricação dos protótipos foi notado que os pacotes de chapa das carcaças 180 e 200 com corte econômico apresentaram algumas dificuldades de manuseio.

Os pacotes travavam em determinadas posições, não permitindo giro em algumas etapas do processo. O problema foi solucionado através do aumento do diâmetro dos roletes e da mudança de posição nas bases giratórias. As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram as bases giratórias.

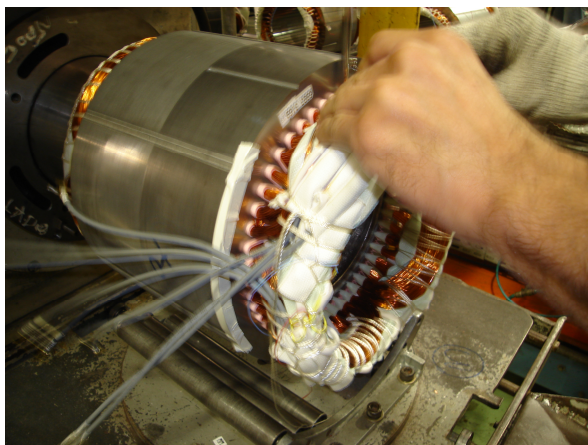


Figura 3.3 – Base giratória motores pequenos

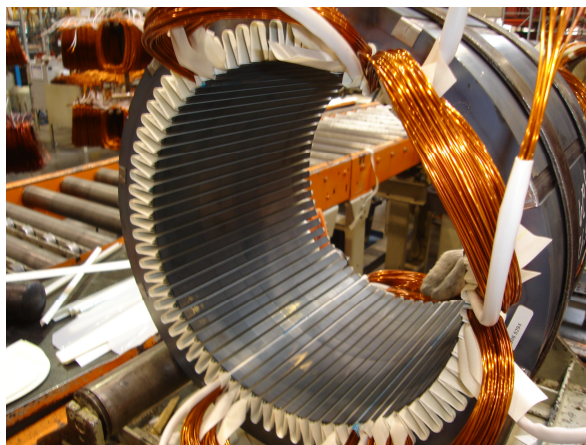


Figura 3.4 – Base giratória motores grandes

### 3.4 Prensagem do pacote de chapas do estator na carcaça

Com a implantação do corte econômico haverá uma diminuição da área de contato entre a carcaça e o pacote de chapas do estator. Esta diminuição da interferência entre eles poderá aumentar a possibilidade de escorregamento do pacote de chapas do estator dentro da carcaça.

A interferência entre carcaça e pacote de chapas é analisada através do coeficiente de segurança. Existem tolerâncias mínimas e máximas para as dimensões da carcaça e estator (dimensão  $\pm$  tolerância). A máxima interferência se dará com a mínima tolerância da carcaça e a máxima tolerância do estator. A mínima interferência se dará com a máxima tolerância da carcaça e a mínima tolerância do estator. Para a interferência média o mínimo coeficiente de segurança aceitável é 4. Este valor é obtido através da relação:

*Coeficiente de segurança* = torque mecânico resistente (conjugado máximo para que não ocorra o escorregamento entre estator e carcaça) / torque máximo (conjugado máximo do motor na ponta do eixo).

Os resultados das análises realizadas para as chapas com e sem corte econômico são apresentados na **Tabela 3.1**. Conforme apresentado em [6], o mínimo coeficiente de segurança aceitável é 4.

**Tabela 3.1 – Coeficiente de segurança**

Carcaça	Polaridade	COEFICIENTE DE SEGURANÇA					
		Valores de Projeto				Valores Praticados	
		Interferência Média		Interferência Mínima		Interferência Média	
		SEM Corte Econômico	COM Corte Econômico	SEM Corte Econômico	COM Corte Econômico	SEM Corte Econômico	COM Corte Econômico
132M	2	5,4	4,1	0	0	50,0	38,5
	4	3,2	2,5	0	0	30,2	23,2
	6	3,3	2,6	0	0	31,1	23,9
	8	6,6	5,1	0	0	61,8	47,6
160L	2	8,5	6,6	0,8	0,6	109,6	85,6
	4	6,0	4,7	0,6	0,5	78,0	60,9
	6	5,0	3,9	0,5	0,4	65,2	50,9
	8	6,9	5,4	0,7	0,5	89,8	70,2
180L	2	3,2	2,7	0	0	72,7	61,1
	4	1,8	1,5	0	0	41,0	34,4
	6	1,6	1,3	0	0	35,7	30,0
	8	2,0	1,7	0	0	45,7	38,5
200L	2	3,6	3,1	0	0	31,1	26,5
	4	2,2	1,9	0	0	19,0	16,1
	6	2,0	1,7	0	0	16,9	14,3
	8	3,0	2,6	0	0	26,0	22,1

Durante a realização das análises, utilizando valores de projeto, foi constatado que, em geral, para as carcaças 132 a 200, a interferência de projeto era insuficiente para resistir à transmissão de torque do motor (coeficientes  $\bullet 4$ ). Porém, a prática mostra o contrário.

Por este motivo os coeficientes foram recalculados com valores praticados devido ao desalinhamento das chapas na montagem do pacote. O diâmetro do pacote foi considerado maior do que o diâmetro da chapa estampada. Com os novos valores, os coeficientes de segurança, em geral, passaram a ser bastante elevados.

Na análise do corte econômico, considerando a mesma situação de dimensão prática, os coeficientes de segurança diminuem, porém ainda continuam elevados e satisfatórios.



Ainda para analisar a interferência entre a carcaça e pacote de chapas foram feitos três protótipos da linha IP23, sendo motores abertos com carcaça ventilada da carcaça 160, 180 e 200, onde a prensagem do pacote de chapas do estator na carcaça ocorreu na pior posição (cortes econômicos com pontos de contato) propositadamente. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram os detalhes.



Figura 3.5 – Motor da linha IP23 – Aberto



Figura 3.6 – Contato entre corte econômico e carcaça

Após a análise, foi constatado que será necessário definir uma posição de prensagem do pacote de chapas do estator na carcaça de modo que os cortes econômicos não coincidam com os pontos de contato da carcaça. Isto implica também em definir posições de bobinagem nos pacotes por causa da saída dos cabos de ligação.



## 4 TIPOS DE ASSIMETRIAS

As ferramentas de estampo proporcionam alguns tipos de assimetrias (cortes), usados para as chapas de estator e rotor dos motores de indução monofásicos e trifásicos [7]. Os estampos podem ser de três tipos de materiais, aço cromo, aço sinterizado ou metal duro. Cada material apresenta uma determinada vida útil, a do aço cromo é de 12 milhões de golpes, a do aço sinterizado é de 40 milhões de golpes e a do metal duro é de 300 milhões de golpes.

O que define o uso de cada estampo é a quantidade de chapas de estator e rotor a serem produzidas, para baixa produção (abaixo de 100 mil chapas) o estampo a ser utilizado é o de aço cromo, para média produção (100 a 400/500 mil chapas) o estampo a ser utilizado é o de aço sinterizado e para a alta produção (acima de 400/500 mil chapas) é o de metal duro. Obviamente quanto maior a vida útil do estampo, maior é o seu valor.

O que determina a largura dos rolos de chapas de aço a alimentar as prensas, são as dimensões dos produtos (chapas do estator) a serem produzidos, conforme norma TBG-0338E da WEG. Os tipos de cortes mais importantes para o estudo serão vistos a seguir.

### 4.1 Corte Convencional

A largura da tira é determinada em função do diâmetro externo da chapa do estator mais folga de 2 mm em cada lateral até diâmetro de 315 mm e o passo da chapa é determinado em função do diâmetro externo da chapa do estator mais folga de 2 mm para evitar interferência entre um estágio e outro na estampagem [7].

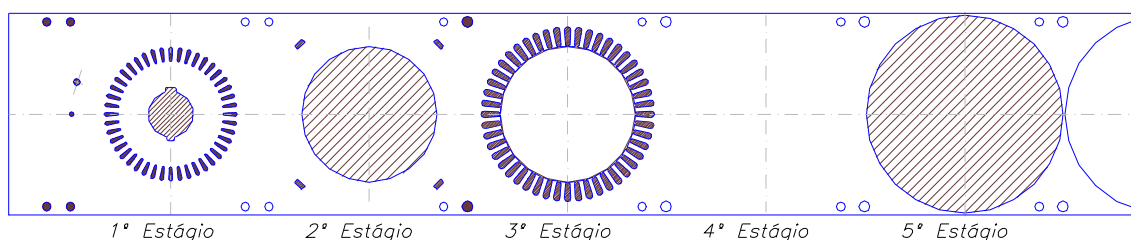


Figura 4.1 – Corte Convencional

A descrição dos estágios da Figura 4.1 é:

1º Estágio: Furos para centradores, furo de referência, furo separador de sucata, furo do eixo e ranhuras do rotor;

2º Estágio: Caudas de andorinha e chapa do rotor;

3º Estágio: Furos de recalibração e ranhuras do estator;

4º Estágio: Em vazio;

5º Estágio: Chapa do estator.

## 4.2 Corte Convencional Econômico

A largura da tira é igual à largura do produto, que é o diâmetro externo da chapa do estator menos corte de 1 ou 1,5 mm em cada lateral e o passo da chapa é o diâmetro externo da chapa do estator menos corte de 1 ou 1,5 mm dependendo da carcaça [7].

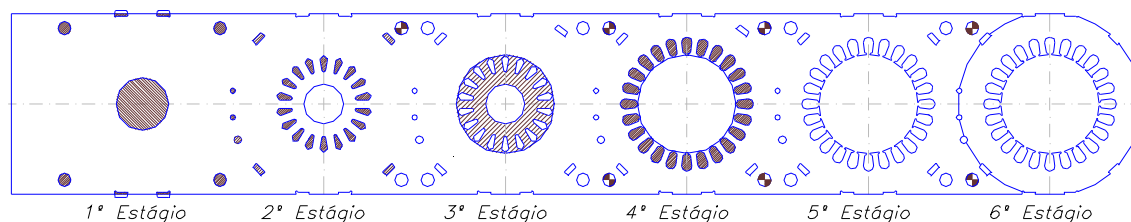


Figura 4.2 – Corte Convencional Econômico

A descrição dos estágios da Figura 4.2 é:

1º Estágio: Furos para centradores, furo para arrastadores e furo do eixo;

2º Estágio: Furo de referência, furos separadores de sucata, caudas de andorinha e ranhuras do rotor;

3º Estágio: Chapa do rotor;

4º Estágio: Ranhuras do estator;

5º Estágio: Em vazio;

6º Estágio: Chapa do estator.

## 4.3 Corte Semi-concêntrico

A largura da tira e o passo da chapa é igual à largura do produto [7].

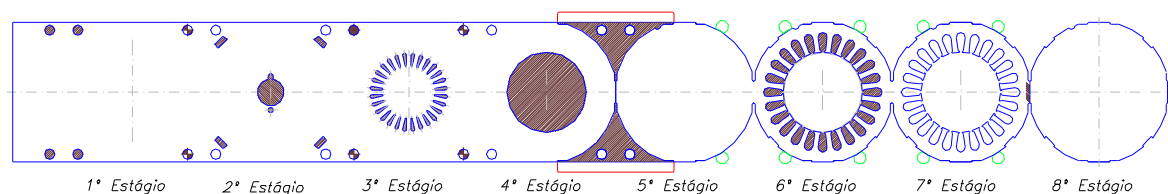


Figura 4.3 – Corte Semi-concêntrico

A descrição dos estágios da Figura 4.3 é:

- 1º Estágio: Furos para centradores;
- 2º Estágio: Caudas de andorinha e furo do eixo;
- 3º Estágio: Ranhuras do rotor;
- 4º Estágio: Chapa do rotor e  $\frac{1}{2}$  diâmetro externo do estator;
- 5º Estágio:  $\frac{1}{2}$  diâmetro externo do estator;
- 6º Estágio: Ranhuras do estator;
- 7º Estágio: Em vazio;
- 8º Estágio: Chapa do estator.

#### 4.4 Corte Concêntrico

A largura da tira e o passo da chapa é igual à largura do produto [7].

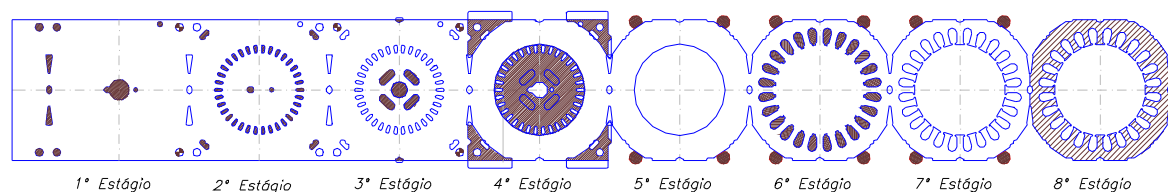


Figura 4.4 – Corte Concêntrico

A descrição dos estágios da Figura 4.4 é:

- 1º Estágio: Furos para centradores e furo do eixo;
- 2º Estágio: Caudas de andorinha e ranhuras do rotor;
- 3º Estágio: Furos ventilação e furo do eixo;
- 4º Estágio: Chapa do rotor e diâmetro externo do estator;
- 5º Estágio: Em vazio;

6º Estágio: Ranhuras do estator;

7º Estágio: Em vazio;

8º Estágio: Chapa do estator.

Tanto o corte semi-concêntrico quanto o corte concêntrico são para quando existir a necessidade de se garantir o valor de entreferro (concentricidade), geralmente para os motores de pequenas carcaças. As ilustrações da prensa, bobinas de chapas, chapas estampadas e pacotes de chapas são mostrados nas Figuras 4.5 a 4.16.



Figura 4.5 – Prensa enclausurada



Figura 4.6 – Ferramenta de estampo



Figura 4.7 – Bobina de aço “mãe”



Figura 4.8 – Bobina de aço cortada alimentando a prensa



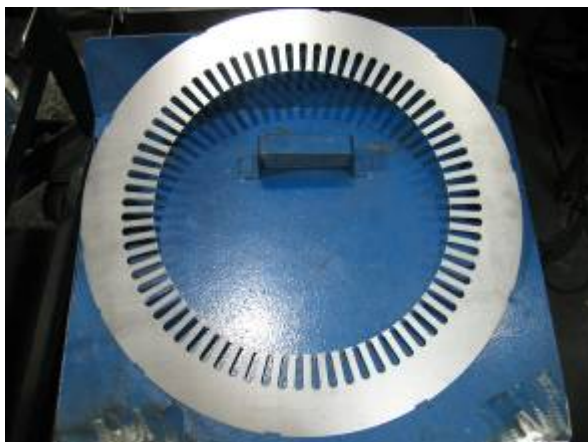


Figura 4.9 – Chapa do estator



Figura 4.10 – Chapa do rotor



Figura 4.11 – Chapa do estator sem corte econômico



Figura 4.12 – Chapa do estator com corte econômico



Figura 4.13 – Pacote do estator sem corte econômico



Figura 4.14 – Pacote do estator com corte econômico



Figura 4.15 – Rotor completo



Figura 4.16 – Pacote de chapas do rotor

## 4.5 Assimetrias Utilizadas

Para a implantação do corte econômico, nas carcaças de 132 a 200, serão utilizados dois tipos de estampos: o estampo de corte convencional que será reformado para fazer somente o corte econômico na largura da tira e o estampo de corte convencional econômico que fará tanto o corte econômico na largura da tira quanto no avanço do passo. A reforma do estampo custará em média 25% do novo estampo, e a escolha de um ou outro estampo dependerá da vida útil dos estampos e da demanda de lâminas a serem produzidas.

Os estampos a serem reformados ou fabricados terão os mesmos materiais utilizados nos estampos atuais, aço cromo, aço sinterizado ou metal duro, cuja escolha dependerá da quantidade do lote de chapas a ser produzido.

### 4.5.1 Corte Convencional Econômico - Reforma do estampo

O estampo de corte convencional será reaproveitada passando por uma reforma para atender o corte econômico nas carcaças 132 a 200, tendo como modificação a posição das réguas guias, não necessitando mais deixar a folga de 2 mm em cada lateral da largura da tira e diminuindo ainda mais 2 mm nesta dimensão com a utilização do corte, totalizando uma diminuição real de 8 mm na largura da tira. A Figura 4.17 mostra o recuo da posição das réguas guias e a Figura 4.18 mostra o novo estampo após a modificação.

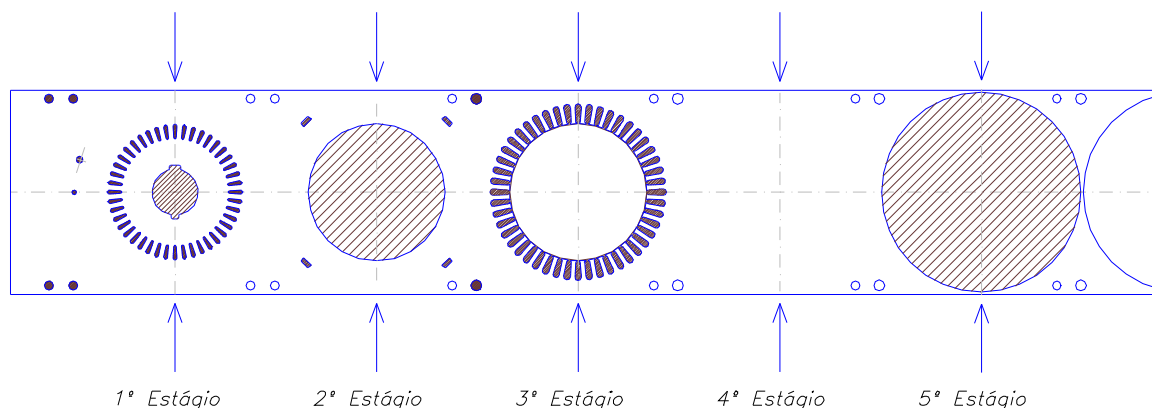


Figura 4.17 – Modificação do estampo de Corte Convencional

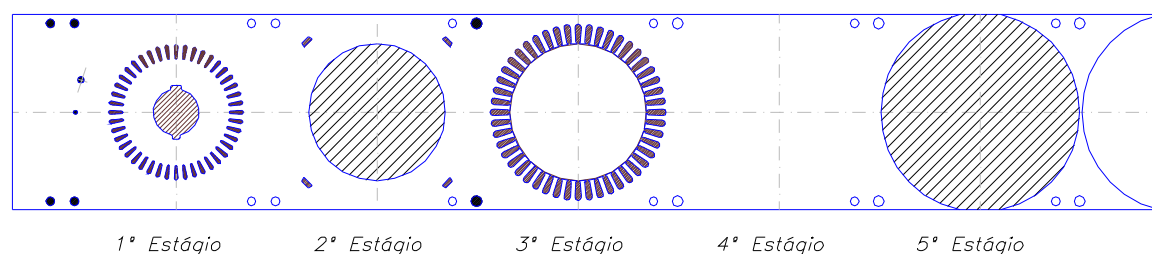


Figura 4.18 – Estampo reformado para o corte convencional econômico na largura da tira

A descrição dos estágios da Figura 4.18 é:

- 1º Estágio: Furos para centradores, furo de referência, furo separador de sucata, furo do eixo e ranhuras do rotor;
- 2º Estágio: Caudas de andorinha e chapa do rotor;
- 3º Estágio: Furos de recalibração e ranhuras do estator;
- 4º Estágio: Em vazio;
- 5º Estágio: Chapa do estator.

#### 4.5.2 Corte Convencional Econômico – Nova ferramenta

Serão fabricados também novos estampas para as carcaças 132 a 200, dependendo de cada estudo de caso, onde a largura da tira é igual à largura do produto, que é o diâmetro externo da chapa do estator menos corte de 2 mm em cada lateral e o passo da chapa é o diâmetro externo da chapa do estator menos corte de 2 mm.

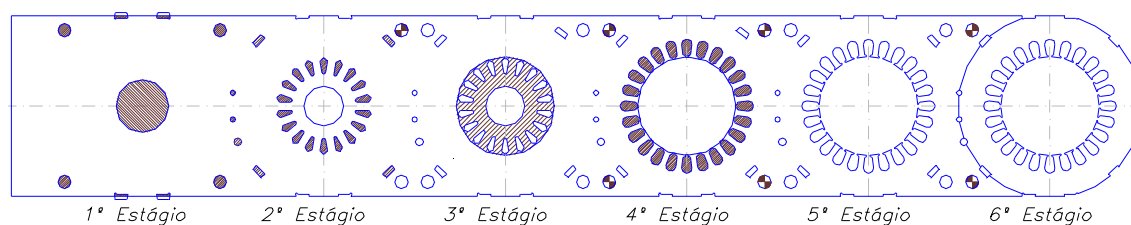


Figura 4.19 – Corte Convencional Econômico

A descrição dos estágios da Figura 4.19 é:

- 1º Estágio: Furos para centradores, furo para arrastadores e furo do eixo;
- 2º Estágio: Furo de referência, furos separadores de sucata, caudas de andorinha e ranhuras do rotor;
- 3º Estágio: Chapa do rotor;
- 4º Estágio: Ranhuras do estator;
- 5º Estágio: Em vazio;
- 6º Estágio: Chapa do estator.



## 5 CÁLCULO ANALÍTICO

Neste capítulo serão apresentadas algumas equações analíticas que auxiliam na análise do desempenho do motor. Na literatura existem vários livros que apresentam essas equações, dentre eles pode-se citar [8], [9], [10] e [11].

### 5.1 Fluxo magnético por pólo do motor

A obtenção do fluxo magnético por pólo do motor é realizada a partir da equação de Faraday-Lenz expressa por [12]:

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (5.1)$$

onde  $U$  é a tensão elétrica ou a força eletromotriz [V] e  $\Phi$  é o fluxo magnético [Wb].

A equação (5.1) implica que uma variação temporal do fluxo magnético é responsável pela criação de uma força eletromotriz. Assim, diretamente relacionada com a geração de eletricidade.

Considerando um motor com “ $N$ ” espiras efetivas por fase, quando alimentado por uma onda de tensão senoidal, tem-se:

$$U = U_{m\acute{a}x} \cos \omega t \quad (5.2)$$

Assim, desprezando a queda de tensão na resistência das bobinas do motor, pode-se escrever:

$$U = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.3)$$

Igualando os termos de (5.2) e (5.3), tem-se:

$$U_{m\acute{a}x} \cos \omega t = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.4)$$

Desse modo, o fluxo magnético é:

$$\Phi = -\frac{U_{m\acute{a}x}}{2\pi f N} \cdot \sin \omega t \quad (5.5)$$

e ainda:

$$\Phi_{m\acute{a}x} = \frac{U_{m\acute{a}x}}{2\pi f N} \quad (5.6)$$

onde  $\Phi_{m\acute{a}x}$  é o valor máximo no tempo e representa o fluxo magnético girante resultante em [Wb].

Pode-se chamar o  $\Phi_{m\acute{a}x}$  simplesmente de  $\Phi$ , pois representa o valor espacial, ou seja, é o valor que se propaga a cada instante no espaço. Sendo:

$$U_{ef} = \frac{U_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad (5.7)$$

onde  $U_{ef}$  é a tensão eficaz por fase em [V] e substituindo (5.7) em (5.6), tem-se:

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} U_{ef}}{2\pi f N} \quad (5.8)$$

Sendo:

$$N = N_{ph} f_{w1} \quad (5.9)$$

onde:

$N$  é o número efetivo de espiras em série por fase;

$N_{ph}$  é o número de espiras em série por fase;

$f_{w1}$  é o fator de enrolamento.

Substituindo (5.9) em (5.8), tem-se o fluxo magnético por pólo do motor [12]:

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} U_{ef}}{2\pi f N_{ph} f_{w1}} \quad (5.10)$$

## 5.2 Indução na coroa do estator

Com a solução da equação (5.10), pode-se calcular a indução magnética na coroa do estator ( $B_{co1}$ ) [12]:

$$B_{co1} = \frac{\Phi / 2}{h_{c1} P_{ac} K_{fe}} \quad (5.11)$$

onde:

$\Phi$  é o fluxo magnético por pólo do motor em [Wb];

$h_{c1}$  é a altura da coroa do estator em [mm];

$P_{ac}$  é o comprimento do pacote do estator em [mm];

$K_{fe}$  é o fator de empilhamento do pacote do estator.

A Figura 5.1 mostra alguns desses parâmetros no estator do motor.

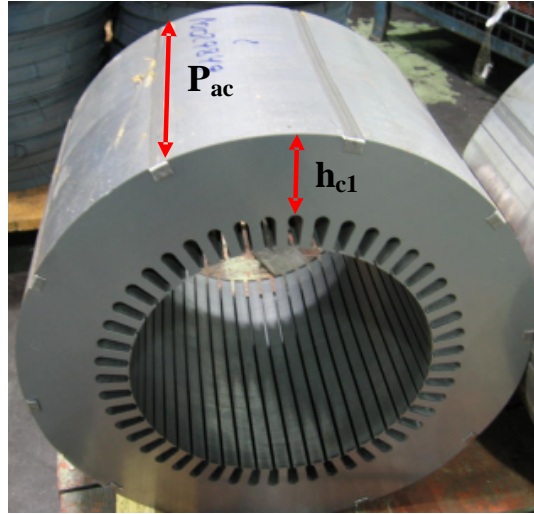


Figura 5.1 – Estator

### 5.3 Corrente magnetizante

A obtenção da corrente magnetizante no motor é realizada a partir da Lei de Ampère na forma integral [13]. Assim, tem-se:

$$fmm = \oint_{L(S)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} = N.I \quad (5.12)$$

onde  $fmm$  é a força magnetomotriz (Ae),  $H$  é o campo magnético [A/m],  $J$  é a densidade de corrente elétrica [A/m<sup>2</sup>] e  $N$  é o número de espiras.

Nos motores, por par de pólos, tem-se:

$$N = (2 Z_1 s_1 \frac{m}{2}) \quad (5.13)$$

onde:

$Z_1$  é o número de espiras por bobina;

$s_1$  é o número de bobinas por pólo e por fase;

$m$  é o número de fases do enrolamento.

Aplicando a equação (5.12) em um circuito magnético de comprimento  $l_{mag}$ , tem-se [12]:

$$H = \frac{(2 Z_1 s_1 \frac{m}{2}) I_{mag}}{l_{mag}} \quad (5.14)$$

Sendo  $m=3$  (trifásico), tem-se que a corrente  $I_{mag}$  é dada por:

$$I_{mag} = \frac{H l_{mag}}{(2 Z_1 s_1 \frac{3}{2})} \quad (5.15)$$

Substituindo  $B = \mu H$  na equação (5.15), obtém-se a corrente magnetizante máxima de pico:

$$I_{mag} = \frac{B l_{mag} / \mu}{(2 Z_1 s_1 \frac{3}{2})} \quad (5.16)$$

A solução para esta equação somente é possível conhecendo-se as forças magnetomotrizes de cada trecho que compõem o comprimento do campo magnético  $l_{mag}$ . Isto somente é possível através de programas de elementos finitos ou programas numérico-analíticos rigorosamente elaborados. Assim, a solução desta equação torna-se mais simples se o sistema for considerado linear, eliminando-se os efeitos da saturação. Considerando um sistema linear, onde  $\mu_{fe} \rightarrow \infty$ , e um entreferro de comprimento  $d'$ , a corrente magnetizante pode ser dada por:

$$I_{mag} = \frac{\Phi 2 d'}{S_{mag} \mu_0 (2 Z_1 s_1 \frac{3}{2})} \quad (5.17)$$

Sendo:

$$S_{mag} = \frac{p D}{2P} P_{ac} \quad (5.18)$$

onde:

$D$  é o diâmetro no centro do entreferro em [mm];

$P_{ac}$  é o comprimento do pacote do estator em [mm];

$2P$  é o número de pólos do motor.

Tem-se, então:

$$I_{mag} = \frac{\Phi d'}{\mu_0 (\frac{p D}{2P} P_{ac}) (\frac{3}{2} Z_1 s_1)} \quad (5.19)$$

Substituindo (5.10) em (5.19), tem-se:

$$I_{mag} = \frac{\sqrt{2} U_{ef} d'}{2p f N_{ph} f_{wl} \mu_0 (\frac{p D}{2P} P_{ac}) (\frac{3}{2} Z_1 s_1)} \quad (5.20)$$

Sendo:

$$N_{ph} = \frac{Z_1 s_1 2P}{a} \quad (5.21)$$

onde  $a$  é o número de caminhos paralelos de corrente por fase.

Substituindo (5.21) em (5.20), tem-se:

$$I_{mag} = \frac{\sqrt{2} U_{ef} d' a}{\frac{3}{2} 2p m_0 f (Z_1 s_1)^2 f_{wl} (p D P_{ac})} \quad (5.22)$$

O valor eficaz da corrente magnetizante é:

$$I_{magef} = \frac{I_{mag}}{\sqrt{2}} \quad (5.23)$$

Substituindo (5.23) em (5.22), tem-se:

$$I_{magef} = \frac{U_{ef} d' a}{3p^2 m_0 f (Z_1 s_1)^2 f_{wl} D P_{ac}} \quad (5.24)$$

Sendo:

$$\Phi = \Phi_{m\acute{a}x} \text{ sen}Wt \quad (5.25)$$

O valor instantâneo da corrente magnetizante será:

$$I_{mag}(t) = \frac{U_{ef} d' a}{3p^2 m_0 f (Z_1 s_1)^2 f_{wl} (p D P_{ac})} \text{ sen}Wt \quad (5.26)$$

## 5.4 Perdas no ferro

As perdas no ferro, que ocorrem numa máquina elétrica, correspondem a uma fração considerável do total de perdas, responsáveis pelo aquecimento desta máquina [12]. Sua eliminação completa não é um fato possível, porém, o conhecimento de suas origens conduz às soluções práticas que permitem minimizá-las. Desta forma, torna-se possível melhorar o rendimento obtido nas máquinas elétricas. O projetista pode ter disponíveis as grandezas que permitem selecionar os materiais a serem aplicados e conhecer as formas mais convenientes de aplicá-los, sempre visando atingir os melhores índices de eficiência técnico-econômica.

As perdas no ferro são devidas às variações do fluxo e podem subdividir-se em perdas por histerese e perdas por correntes parasitas (Foucault).

As duas parcelas de perdas são afetadas pela concentração auto-indutiva do fluxo e pela distribuição irregular da indução sobre cada seção plana do circuito magnético, devido às necessidades construtivas da máquina.

Devem ser consideradas também outras perdas adicionais produzidas pelo fluxo indutor, tais como, as perdas superficiais que provém da pulsação do fluxo nas superfícies polares, as perdas adicionais de origem similar na massa dos dentes e as perdas adicionais por assimetrias dos campos girantes (campos elípticos).

Os fluxos de dispersão causam, por sua vez, as perdas adicionais no ferro que somente se apresentam em carga.

#### 5.4.1 Perdas no ferro por histerese

Supondo que a seção transversal de um núcleo de ferro é  $S_{Fe}$ , que o comprimento de seu circuito magnético é  $L$ , e que está enrolado com uma bobina de  $W$  espiras [12]. À medida que a corrente de excitação varia ciclicamente desde  $-I_m$  até  $+I_m$ , o fluxo variará desde  $-\Phi_m$  até  $+\Phi_m$  na forma mostrada na Figura 5.2.

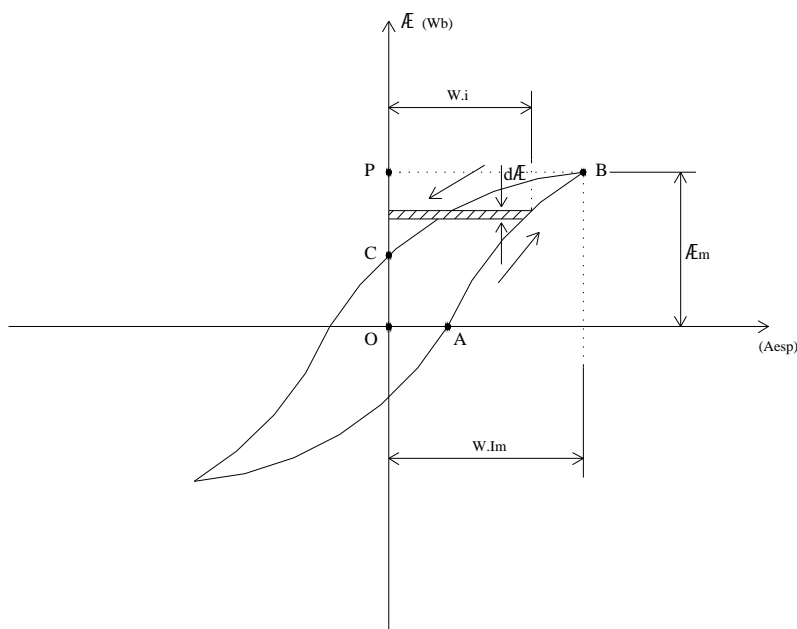


Figura 5.2 – Ciclo de histerese

Sobre a curva ascendente AB, uma variação na excitação desde  $W i$  até  $W (i+di)$  no tempo  $dt$ , dá origem a um aumento no fluxo  $d\Phi$ . A força eletromotriz induzida no enrolamento é expressa por:

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.27)$$

Esta força eletromotriz é compensada mediante uma componente igual e oposta da tensão aplicada, para ser mantida a corrente. Portanto, a potência instantânea proporcionada pelo circuito de excitação é igual a  $(-e).i$ , de modo que a energia proporcionada no intervalo  $dt$  é:

$$(-e) i dt = W i d\Phi \quad (5.28)$$

que é proporcional à superfície do elemento infinitesimal mostrado na Figura 5.2, do que se deduz que a energia consumida enquanto o ciclo é percorrido desde o ponto A até o ponto B será representada pela área OABP.

Quando a excitação se reduz a zero, o fluxo segue a curva BC, isto é, diminui enquanto a corrente conserva seu sentido original. A força eletromotriz induzida troca de sinal, de modo que a energia volta ao circuito de alimentação em uma quantidade proporcional à área BCP. Continuando, analogamente, ponto a ponto ao redor do ciclo até alcançar o ponto de partida, a energia líquida consumida por ciclo completo fica representada pela área interior ao ciclo, ou seja:

$$E_c = \int_{-\Phi_m}^{+\Phi_m} W i d\Phi \quad (5.29)$$

onde:

$$d\Phi = S_{Fe} dB \quad (5.30)$$

$$W i = H L \quad (5.31)$$

Portanto, resulta que a energia líquida é dada por:

$$E_c = S_{Fe} L \int_{-B_m}^{+B_m} H dB \quad (5.32)$$

onde  $E_c$  é a energia líquida consumida por ciclo em [Joule].

A equação (5.32) mostra que as perdas por histerese são proporcionais ao volume do núcleo e à área do ciclo de histerese traçado em função de  $B$  e  $H$ .

A integral que aparece nas equações (5.29) e (5.32) não pode ser resolvida por métodos matemáticos, porque a relação funcional entre as variáveis é desconhecida. Todavia, por experimentação tem-se chegado ao resultado (descoberto primeiramente por Charles P. Steinmetz) de que a área do ciclo de histerese vem a ser proporcional a  $B_m^\alpha$ . O valor de  $\alpha$  para o aço doce utilizado nas experiências de Steinmetz era de 1,6, porém o aço

silício empregado atualmente se caracteriza por valores de  $\alpha$  que oscilam entre 1,7 e pouco mais de 2,0.

Substituindo  $(S_{Fe} L)$ , na equação (5.32), por  $M/\delta$ , onde  $M$  é a massa do núcleo e  $\delta$  é a densidade do material do núcleo, e considerando que a frequência do fluxo é  $f$  ciclos por segundo, as perdas por histerese serão:

$$p_h = Q_h \frac{M}{\delta} f B_m^\alpha \quad (\text{W}) \quad (5.33)$$

onde:

$Q_h$  é a constante de proporcionalidade característica do material do núcleo;

$B_m$  é a indução máxima em [T];

$\alpha$  é o coeficiente de Steinmetz.

As chapas industriais combinadas (ligas), mostram uma relação entre a área interior do ciclo de histerese ( $A_h$ ) e a indução magnética  $B_m$ , da forma:

$$A_h = a B_m + b B_m^\alpha \quad (5.34)$$

As constantes  $a$  e  $b$  são particulares para cada tipo de chapa; porém com induções  $B_m > 1$  T, como sempre se encontram nas máquinas elétricas, o termo linear ( $a B_m$ ) resulta desprezível comparado com ( $b B_m^\alpha$ ), podendo escrever-se praticamente:

$$(W / kg)_h = K_h f B_m^\alpha \quad (\text{W/kg}) \quad (5.35)$$

onde  $K_h$  é o coeficiente das perdas por histerese (Foucault).

O fator  $K_h$  varia entre 0,028 para a chapa fortemente combinada (tipo comercial de 1,7 W) e 0,048 (tipo comercial de 3,6 W), todas elas destinadas a máquinas elétricas rotativas.

As perdas específicas  $(W/kg)_h$  por histerese dependem, portanto, da indução máxima e da frequência, porém são independentes da forma de onda no tempo ou no espaço do fluxo e da espessura da chapa.

Modificando a equação (5.33) para:

$$\frac{p_h}{M} = \frac{Q_h}{\delta} f B_m^\alpha \quad (\text{W}) \quad (5.36)$$

e comparando com a equação (5.35) tem-se:



$$K_h = \frac{Q_h}{d} \quad (5.37)$$

#### 5.4.2 Perdas no ferro por correntes parasitas (Foucault)

A Figura 5.3 representa a seção transversal de um núcleo laminado, sendo sua espessura  $t$  e sua largura  $ct$ , onde  $c$  é um fator consideravelmente maior que a unidade [12]. Supõe-se que o comprimento do núcleo (no sentido perpendicular à seção transversal) é a unidade e que a densidade de fluxo está uniformemente distribuída sobre a seção transversal, que varia harmonicamente (senoidalmente) com o tempo e que seu valor máximo é  $B_m$ .

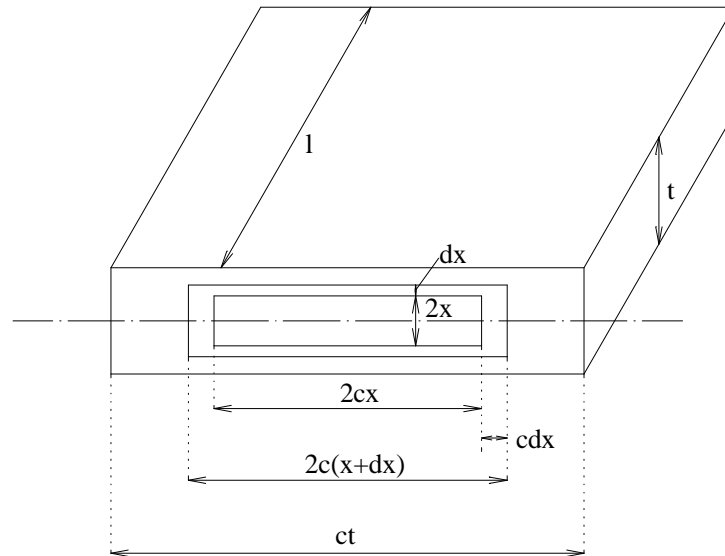


Figura 5.3 – Chapa laminada.

Pode ser considerado que a seção transversal está formada por um conjunto de elementos limitados por retângulos semelhantes dos quais o mais interior tem os lados  $2x$  e  $2cx$  e o mais exterior os lados  $2(x+dx)$  e  $2c(x+dx)$ . A alternância do fluxo dentro do retângulo interior estabelecerá uma força eletromotriz no caminho elementar, que por sua vez, dará origem à corrente no mesmo caminho.

O fluxo máximo correspondente ao elemento de uma espira é:

$$\Phi_m = \int_A B_m dA \quad (5.38)$$

$$A = 2cx \cdot 2x = 4c x^2 \quad (5.39)$$

$$\Phi_m = B_m \cdot 4cx^2 \quad (5.40)$$

O fluxo senoidal, dentro do retângulo interior, fica então, dado por:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t = B_m 4cx^2 \sin \omega t \quad (5.41)$$

E a força eletromotriz induzida, por:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = B_m 4cx^2 2p f \cos 2p f t \quad (5.42)$$

A força eletromotriz eficaz será:

$$U = \frac{2p}{\sqrt{2}} 4 f B_m cx^2 = \frac{8p}{\sqrt{2}} f B_m cx^2 \quad (5.43)$$

Esta força eletromotriz atua no caminho elementar cuja resistência é:

$$R = r \frac{\text{comprimento}}{\text{seção transversal}} \quad (5.44)$$

e

$$R = r \left( \frac{4cx}{dx} + \frac{4x}{cdx} \right) = \frac{4r x}{dx} \frac{c^2 + 1}{c} \quad (5.45)$$

onde:  $\rho$  é a resistividade do material em  $[\Omega.m]$ .

Portanto, as perdas no elemento em [W] são dadas por:

$$dp = \frac{U^2}{\frac{4r x}{dx} \frac{(c^2 + 1)}{c}} = \frac{8p^2 f^2 B_m^2 x^3}{r} \frac{c^3 dx}{(c^2 + 1)} \quad (5.46)$$

E as perdas totais em [W]:

$$p_e = \frac{8p^2 f^2 B_m^2}{r} \frac{c^3}{(c^2 + 1)} \int_0^{t/2} x^3 dx \quad (5.47)$$

$$p_e = \frac{p^2 f^2 B_m^2}{8 r} \frac{c^3 t^4}{(c^2 + 1)} \quad (5.48)$$

O volume de ferro em  $[m^3]$ , no qual ocorrem estas perdas é:

$$V = \frac{M}{\delta} = t c t 1 = c t^2 \quad (5.49)$$

Portanto:

$$p_e = \frac{\pi^2}{8\rho} \frac{M}{\delta} f^2 B_m^2 t^2 \frac{c^2}{(c^2 + 1)} \quad (5.50)$$

Considerando  $c$  é muito maior que a unidade, tem-se que:

$$\frac{c^2}{c^2 + 1} = 1 \quad (5.51)$$

Desta forma, as perdas por correntes parasitas (Foucault) são:

$$p_e = Q_e \frac{M}{d} f^2 B_m^2 t^2 \quad (5.52)$$

onde  $Q_e$  é a constante de proporcionalidade característica do material do núcleo.

A diferença entre o valor real e o teórico da constante é explicada pelo fato de que a indução magnética não se distribui uniformemente sobre a seção transversal tal como havia sido suposta, mas sim que tende a concentrar-se mais na superfície exterior das chapas. E também pelo fato de que o isolamento entre as chapas não é perfeito, com o resultado de que os verdadeiros caminhos das correntes não são tão exatos como os supostos.

A concentração do fluxo em direção à superfície exterior das chapas obedece ao fato de que as correntes parasitas exercem uma ação desmagnetizante que se torna maior a medida que vai se aproximando do centro da seção desde a superfície. Esta ação desmagnetizante das correntes parasitas é análoga à do enrolamento secundário sobre o primário, o que leva a conclusão de que os caminhos das correntes parasitas são equivalentes a um enrolamento secundário auxiliar (porém inútil e supérfluo) além do secundário principal.

A dedução da fórmula básica demonstra que as perdas por correntes parasitas são inversamente proporcionais à resistividade do material do núcleo, o que justifica em grande parte o emprego do aço silicioso na construção de núcleos para transformadores, visto que sua resistividade é superior a do aço doce que se utilizava anteriormente. O aço silicioso tem, além disso, a vantagem de que carece do efeito de “envelhecimento” que faz com que as perdas no núcleo de aço aumentem com o uso.

Pela demonstração realizada, pode ser concluído que as perdas por correntes parasitas, com indução alternada de variação senoidal no tempo, em W/kg, são proporcionais ao quadrado da indução  $B_m$ , ao quadrado da frequência  $f$  e à espessura  $t$  das chapas, resultando:

$$(W / Kg)_e = K_e f^2 B_m^2 t^2 \quad (W/kg) \quad (5.53)$$

onde:  $K_e$  é o coeficiente das perdas por correntes parasitas (Foucault) e  $t$  é a espessura do núcleo laminado [mm].

O fator  $K_e$  oscila entre  $0,45 \times 10^{-3}$  para a chapa comercial denominada de 1,7 W e  $2 \times 10^{-3}$  para a de 3,6 W. Estes valores valem somente com chapas perfeitamente isoladas e sem rebarbas. Sendo assim, elas são valores teóricos iniciais para o cálculo das perdas no ferro.

Modificando a equação (5.52) para:

$$\frac{P_e}{M} = \frac{Q_e}{d} f^2 B_m^2 t^2 \quad (W) \quad (5.54)$$

E comparando com a equação (5.53) tem-se:

$$K_e = \frac{Q_e}{d} \quad (5.55)$$

#### 5.4.3 Perdas totais no ferro

No cálculo de máquinas não há, geralmente, um interesse especial em separar as perdas por histerese das perdas por correntes parasitas, podendo, serem computadas englobadas como perdas específicas no ferro (W/kg) [12]:

$$(W / kg) = (W / kg)_h + (W / kg)_e \quad (5.56)$$

Assim,

$$(W / kg) = K_h f B_m^\alpha + K_e f^2 B_m^2 t^2 \quad (W/kg) \quad (5.57)$$

Se a frequência  $f$  e a espessura  $t$  forem fixadas em valores constantes, resulta que:

$$(W / kg) = f(B_m) \quad (5.58)$$

Conforme foi visto anteriormente, o coeficiente  $\alpha$ , para o aço silício empregado atualmente, oscila entre 1,7 e pouco mais de 2,0. Para fins de estimativa e para facilitar a formalização da equação, pode ser considerado  $\alpha = 2,0$ . As perdas específicas no ferro (W/kg) podem ser representadas graficamente por famílias de curvas cujos parâmetros sejam  $f$  e  $t$ . Com um conjunto de curvas que consideram as frequências envolvidas, as espessuras das chapas (0,35 mm para transformadores; 0,5 a 0,6 mm para máquinas girantes em geral e 1 mm para expansões e pólos laminados) e as induções, o projetista dispõe de todos os dados necessários para o cálculo.

Estas curvas de perdas específicas no ferro são determinadas exclusivamente por via experimental com o quadro de Epstein. Somente assim é obtido o valor prático, visto que as aplicações das fórmulas teóricas descritas conduzem a resultados pouco aproximados. As perdas medidas com o quadro de Epstein têm que ser aumentadas mediante a aplicação de coeficientes empíricos, devidos às perdas suplementares.

As chapas magnéticas são qualificadas precisamente pela cifra de perdas totais em W/kg medidas pelo quadro de Epstein à frequência de 50 Hz e com induções 1 T para a chapa laminada a quente ou 1,5 T para a chapa laminada a frio, de grãos orientados.

## 6 CÁLCULO ELETROMAGNÉTICO ANALÍTICO

Definido o motor a ser utilizado e a dimensão do corte, utilizou-se o programa de cálculo M2E [2] para verificar e comparar o desempenho do motor de indução trifásico para três projetos iguais com chapas diferentes. O projeto (CC) utilizou a chapa convencional sem corte econômico, o projeto (CET) utilizou a chapa com corte econômico na tira de 2 mm e o projeto (CETP) utilizou a chapa com corte econômico na tira e avanço do passo também de 2 mm. As três chapas são ilustradas nas Figuras 6.1 a 6.3 respectivamente.

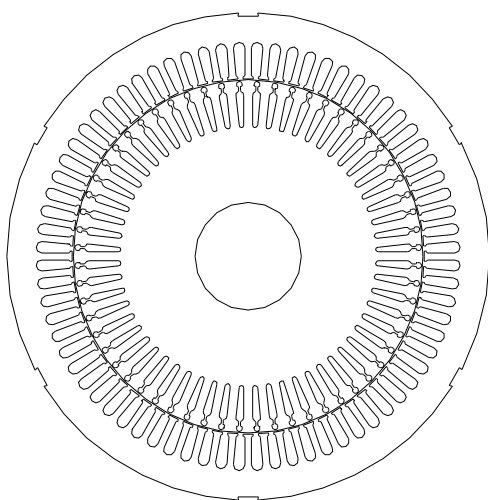


Figura 6.1 – Projeto (CC) - Chapa convencional sem corte econômico

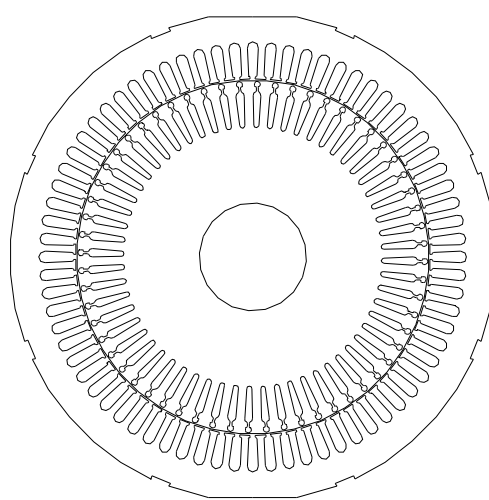


Figura 6.2 – Projeto (CET) - Chapa com corte econômico na tira de 2 mm

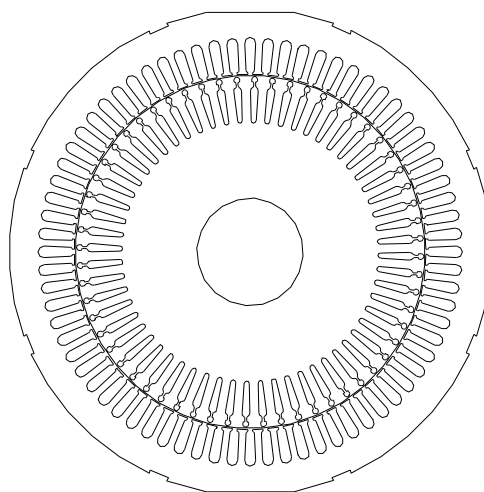


Figura 6.3 – Projeto (CETP) - Chapa com corte econômico na tira e avanço de passo de 2 mm

O M2E [2] é um software desenvolvido no Brasil, superando com muita vantagem outros programas de cálculo analítico, pela confiabilidade de seus resultados comparados com os ensaios. Os dados de entrada do programa são tirados da folha de especificação eletromecânica, onde se encontram os dados referentes ao projeto elétrico do motor. Esta especificação eletromecânica é um documento que acompanha o motor durante todo o seu processo de fabricação. Um modelo dessa especificação pode ser visto na Figura 6.4.

ESPECIFICACAO ELETROMECHANICA DE MOTORES TRIFASICOS										EB 6991.4943 REV 3																																																																					
cv 20										kW 15										Freq. 60 HZ																																																											
Polos 6P										Carcaca 160L										Tensao 220/380V										Isol F																																																	
Linha: NORMAL										Material Involucro: FERRO-FUNDIDO										Desenho:																																																											
-----										DADOS DE BOBINAGEM										-----																																																											
ENROLAMENTO 6P										Lz1.: 790																																																																					
2 Fios de 0.850										Item: 0109.0852										Peso.: 3.582 Kg										Tp: NORMAL																																																	
3 Fios de 0.800										Item: 0111.3208										Peso.: 4.767 Kg										Tp: NORMAL																																																	
Espiras: 12										Somatorio de Espiras: 12:24:36:48:60:72										Passo: 1:11																																																											
Camada.: UNICA										Ligacao: 2xPARALELO																																																																					
Esquema: 72-006-11/212-ND										Bobinas Por Grupo: 2																																																																					
Grupos por Fase: 6										Enchimento: 0.375 (0.697)																																																																					
R1 20.C Fase										0.1700 ( 0.1890)										0.2080 ohms																																																											
R1 20.C Lig.										0.1140 ( 0.1260)										0.1390 ohms																																																											
-----										DIMENSOES PRINCIPAIS										-----																																																											
D. Ext   240.00   173.90										Anel Curto 9.50 x 27.00										Interm.																																																											
D. Int   175.00   53.00										Liga de Aluminio 99.5																																																																					
NR   72   60										Tipo Chapa 1100-60SP										Espessura 0.60																																																											
Area   84.54   65.70										Rotor Com Choque Termico										Rabo Andorinha 6 x 10																																																											
Tratam  DESCARBO SEM										Entref.: 0.550										Inclin.: 9.10																																																											
Item chapa Est 6003.7825										Rot 6003.7825										Pacote : 260																																																											
-----										MATERIAIS ISOLANTES										-----																																																											
VERNIZ F										- Item: 0325.0014										Quantidade: 0.35																																																											
DILUENTE										- Item: 0300.0002										Quantidade: 0																																																											
BARBANTE: NYLON										Area dos Isolantes: 13.800 mm2																																																																					
FILMES ISOLANTES										ITEM										CL.										COMP										LARG.										ESPES										QTDE										PESO(KG)									
ENTRE FASES 1										6854.6204										F										750.0										45.0										0.300										4										0.0473									
FUND. RANH. SUPERIOR										8100.0972										F										275										35										0.300										72										0.2547									
FECHAMENTO 1										8100.0727										F										280										11										0.300										72										0.0799									
REFORCO										8100.0425										F										120										16										0.300										6										0.0040									
-----										DADOS DE CABOS										-----																																																											
Placa de bornes SEM										Tipo de cabo NORMAL										Classe F																																																											
Bitola   Compr.   Qtde										Item   Comp.Total   Extr.Desc.										Terminal   P																																																											
10   400   6										0114.1309   2400   40 x 7										0332.0065   6P																																																											
-----										TUBOS ISOLANTES										-----																																																											
Tubos Isolantes Classe F																																																																															
Diam Comp Qtde Pol Comp.Tot.										Item  Diam Comp Qtde Pol Comp.Tot.										Item																																																											
3   250   12   6P   3000										0125.1031																																																																					
12   80   6   6P   480										0123.3527																																																																					
-----										ACESSORIOS										-----																																																											
Processo de Fabricacao : PROCESSO MANUAL																																																																															
Obs:																																																																															
-----																																																																															
Executado: ERICA ADAM										Verificado:										Data 24/11/2006																																																											

Figura 6.4 – Especificação Eletromecânica

Efetuuou-se o cálculo teórico no M2E [2], para um motor de item 6991.4943 de 20 cv, VI pólos, carcaça IEC 160L, na tensão de 380V, 60 Hz. Foram simuladas as estruturas das Figuras 6.1 a 6.3, obtendo-se todos os resultados de desempenho para as comparações.

Foram escolhidas grandezas mais relevantes e diretamente influenciadas pelos

cortes econômicos, como: corrente a vazio ( $I_0$ ), corrente nominal ( $I_n$ ), perdas no ferro ( $P_{fe}$ ), perdas Joule no estator ( $P_{jl}$ ), rendimento a 100% de carga ( $\eta\%$ ) e fator de potência a 100% de carga ( $\cos \phi$ ). Algumas relações também foram incluídas, como conjugado de partida por conjugado nominal ( $C_p/C_n$ ), conjugado máximo por conjugado nominal ( $C_{m\acute{a}x.}/C_n$ ) e corrente de partida por corrente nominal ( $I_p/I_n$ ), conforme apresentadas na **Tabela 6.1**.

**Tabela 6.1 – Resultados dos cálculos no M2E**

	Projeto (CC)	Projeto (CET)	Projeto (CETP)
$I_0$ (A)	17,674	17,681	17,729
$I_n$ (A)	31,948	31,950	31,968
$P_{fe}$ (W)	493,593	495,622	496,418
$P_{jl}$ (W)	756,428	757,495	757,913
$\eta(100\%)$	88,94	88,93	88,92
$\cos \phi$ (100%)	0,787	0,787	0,787
$C_p/C_n$	2,70	2,69	2,69
$C_{m\acute{a}x.}/C_n$	3,25	3,25	3,25
$I_p/I_n$	7,16	7,16	7,16

Dentre os dados da **Tabela 6.1**, o valor das perdas no ferro ( $P_{fe}$ ) está diretamente associado à área disponível na coroa do estator, onde se tem a passagem do fluxo do campo magnético.

A retirada de material da chapa do estator na Figura 6.2 e Figura 6.3, cria um espaço de ar adicional que diminui a superfície de contato entre a parte externa do estator e a parte interna da carcaça do motor. Tal condição diminui a dissipação térmica, acarretando na elevação de temperatura do motor. Com o aumento da temperatura ocorrem alterações nas perdas do motor (efeito Joule), esta condição não está prevista no programa de cálculo analítico M2E [2]. Desta forma o desempenho do motor é baseado apenas nas variações magnéticas na chapa.

Os resultados obtidos com o programa M2E levam em conta as não linearidades do ferro e os valores de indução são obtidos por meio de uma seção equivalente.

A **Tabela 6.2** apresenta os valores de indução calculados com o M2E [2]:

**Tabela 6.2 – Cálculo Eletromagnético Analítico no M2E dos Valores das Induções**

Motor 20cv VI pólos carcaça IEC 160L	$B_{co1}$ (T)	$B_{de1}$ (T)	$B_{co2}$ (T)	$B_{de2}$ (T)	$B_{ef}$ (T)
Projeto (CC)	1,414	1,810	0,554	1,687	0,908
Projeto (CET)	1,416	1,810	0,554	1,687	0,908
Projeto (CETP)	1,428	1,810	0,554	1,687	0,908

onde:

$B_{co1}$  é a indução na coroa do estator em [T];

$B_{de1}$  é a indução do dente do estator em [T];

$B_{co2}$  é a indução na coroa do rotor em [T];

$B_{de2}$  é a indução do dente do rotor em [T];

$B_{ef}$  é a indução no entreferro em [T].

Analisando a **Tabela 6.2** observa-se que os valores das induções na coroa do estator variaram. Todavia, os resultados das demais induções se mantiveram constantes. Estes resultados são obtidos por meio de uma seção equivalente. É preciso verificar as equações usadas no M2E para compreender as razões pelas quais as induções no dente do estator e na coroa e no dente do rotor se mantiveram constantes.



## **7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL USANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Com base nos valores de desempenho do motor, obtidos através de cálculos teóricos com o software M2E [2], utilizou-se outra ferramenta de estudo denominada EFCAD [3], a qual utiliza simulações através do método de elementos finitos (MEF) para análise eletromagnética.

O EFCAD [3] é um software de análise dos fenômenos eletromagnéticos pelo método de elementos finitos. O programa simula o comportamento de equipamentos elétricos por meio dos campos elétricos e magnéticos por eles gerados, a partir da geometria real do objeto modelado. Isto permite o projeto e a otimização de equipamentos em curto espaço de tempo e a custos bastante reduzidos, uma vez que os protótipos físicos são substituídos por modelos, os quais são facilmente modificados e analisados na tela do computador.

### **7.1 Desenho da estrutura da chapa**

Com base no banco de dados de chapas, pode-se ter as dimensões exatas para usar no módulo de desenho efd.exe, parte integrante do software de simulação eletromagnética EFCAD [3], para desenhar o motor. O desenho da chapa para a simulação é da metade da estrutura, a fim de aproveitar as características de simetria do motor no programa de simulação. Os grampos de fixação das chapas do estator foram desprezados no desenho, por não interferirem de forma significativa nas linhas de fluxo magnético. Com o desenho pronto, foi definido os materiais, as condições de contorno e foi realizada a discretização do domínio de estudo (malha).

Os materiais constituintes do motor, as fontes de corrente, as condições de periodicidade, as condições de contorno do tipo Dirichlet (potencial igual a zero no diâmetro interno do rotor, potencial igual a zero no diâmetro externo do estator), e a malha foram definidas no módulo efm.exe.

As fontes de correntes foram denominadas conforme a Figura 7.1, com o objetivo de obter uma distribuição adequada dos enrolamentos para a formação dos pólos em um sistema trifásico, de acordo com o esquema de bobinagem mostrado na Figura 7.2.

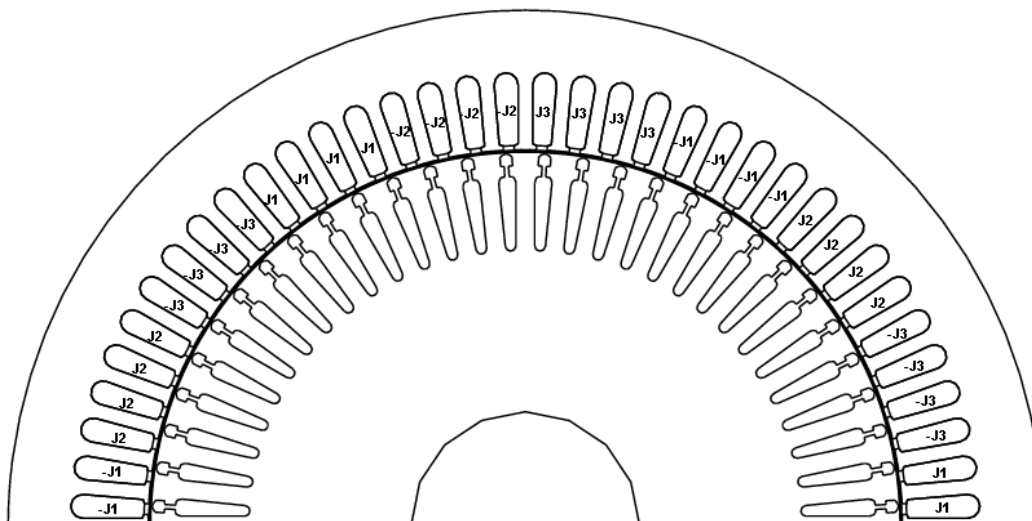


Figura 7.1 – Orientação das fontes de corrente

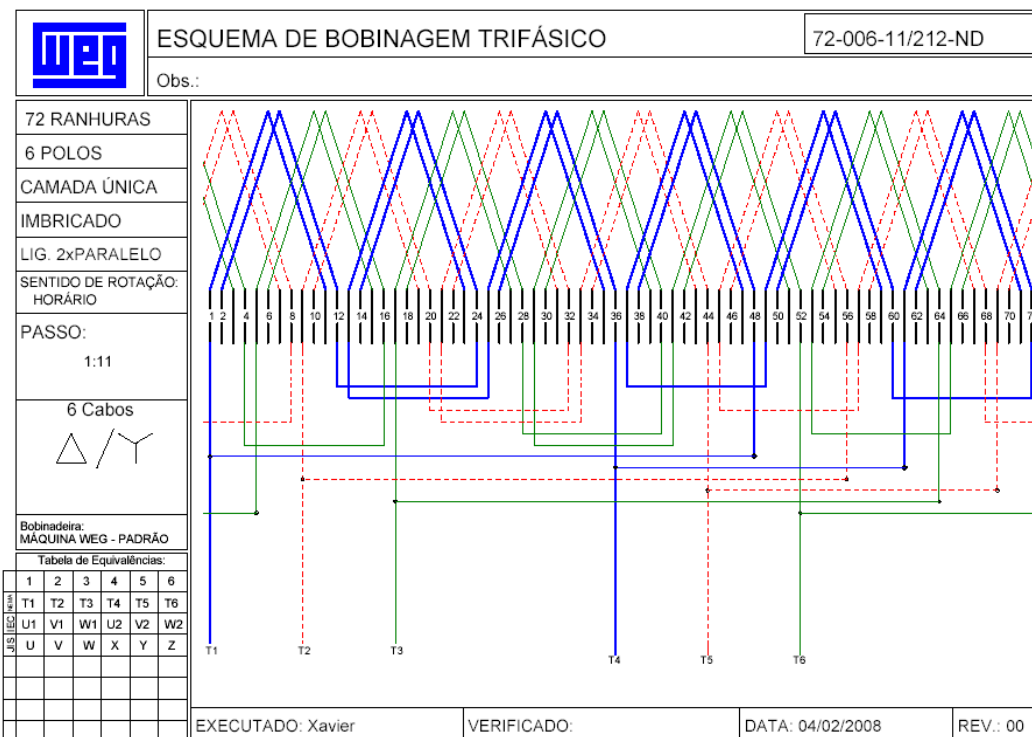


Figura 7.2 – Esquema de bobinagem

Finalmente fez-se a discretização da estrutura, considerando malha fina para os três casos. A Figura 7.3 mostra a chapa sem corte econômico, discretizada com os respectivos materiais e condições de contorno consideradas.

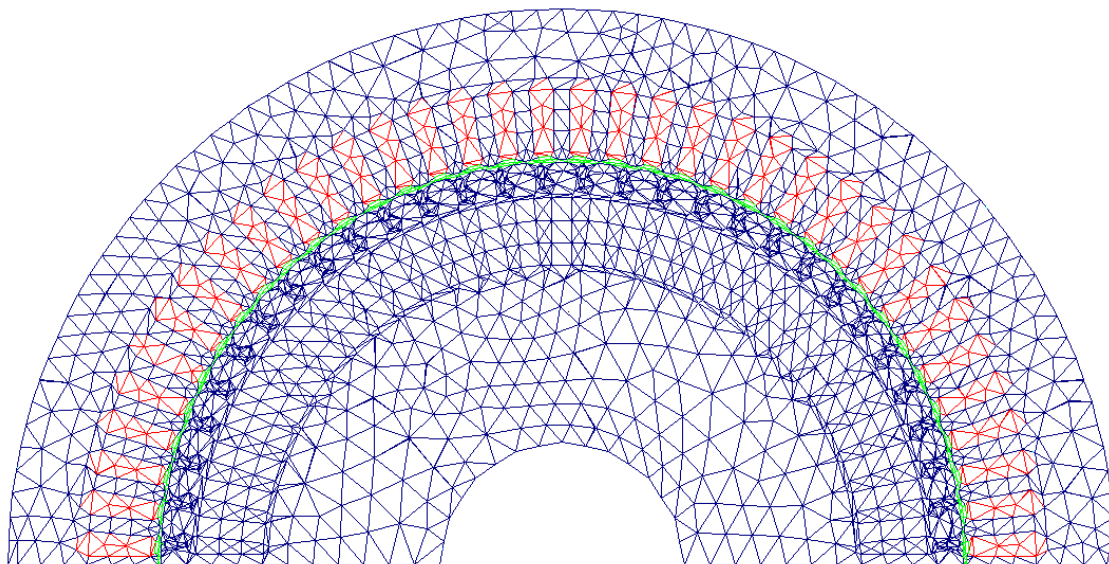


Figura 7.3 – Chapa sem corte econômico discretizada

Os materiais utilizados foram: aço 1006 tratado para a chapa do estator, aço 1006 sem tratamento para a chapa do rotor, alumínio para as barras do rotor e ar para as demais regiões.

A **Tabela 7.1** mostra as características dos materiais utilizados.

**Tabela 7.1 – Características dos Materiais**

Tipo	Material	Permeabilidade	Condutividade
14	Aço 1006 com tratamento	Obtida da Curva 1	$1,0 \cdot 10^7$
15	Aço 1006 sem tratamento	Obtida da Curva 2	$1,0 \cdot 10^7$
21	Alumínio	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$0,302 \cdot 10^7$

As curvas BxH para as chapas de aço com tratamento e sem tratamento são mostradas nas Figuras 7.4 e 7.5, respectivamente. Essas curvas são utilizadas na WEG.

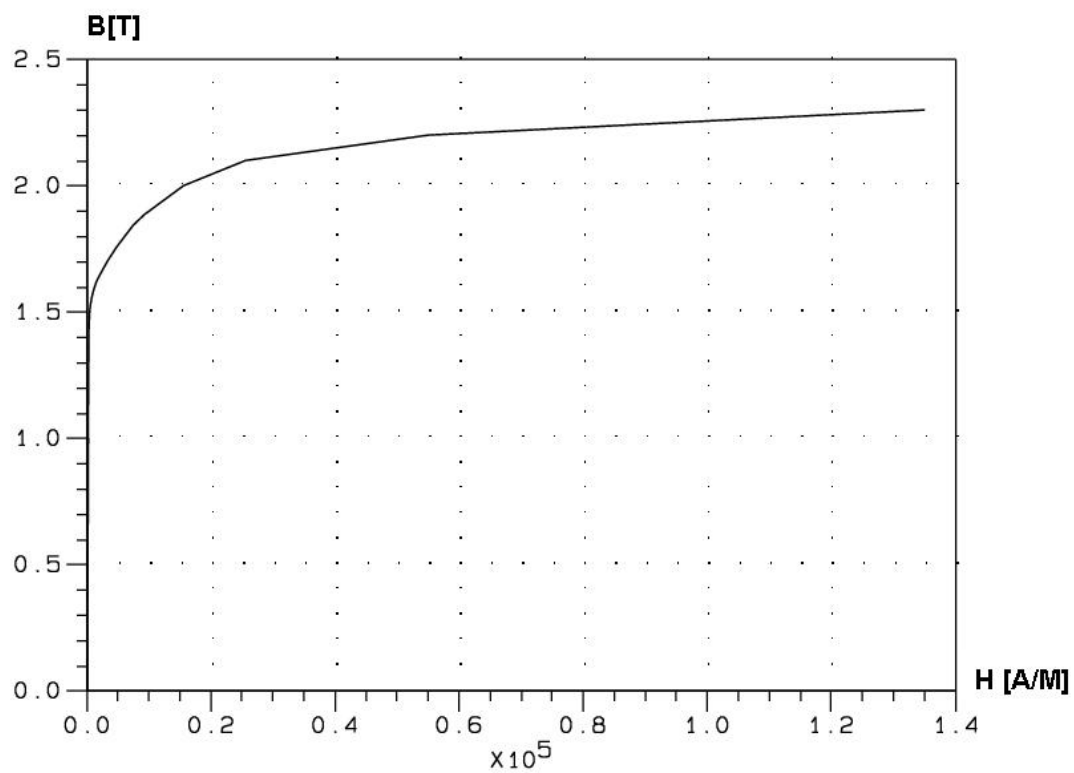


Figura 7.4 – Curva 1: Aço 1006 com tratamento

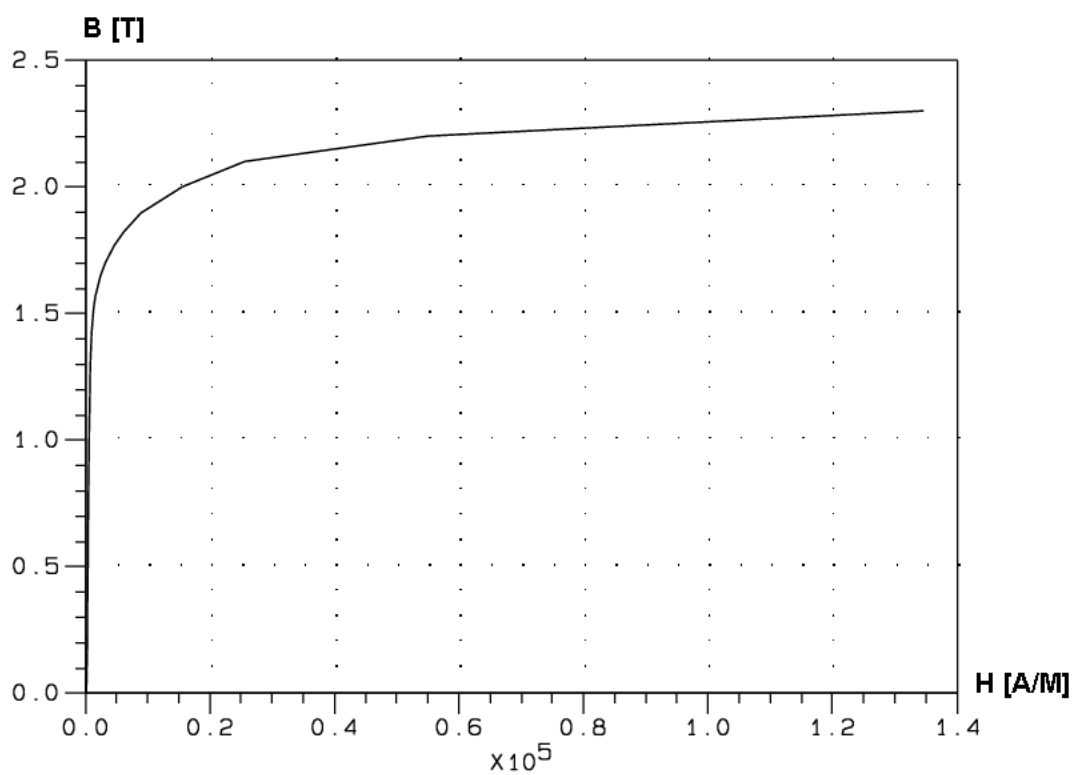


Figura 7.5 – Curva 2: Aço 1006 sem tratamento

## 7.2 Simulação Estática

A simulação estática mostra as características de desempenho do motor num ponto fixo de observação, tais como, valores de corrente, tensão, indutâncias, entre outros. Com os valores de correntes em módulo, obtêm-se as demais características que envolvem o funcionamento de um motor como se fosse tirada uma “foto” num determinado ponto de operação. Os cálculos aqui apresentados foram obtidos levando-se em conta as curvas das chapas mostradas nas Figuras 7.4 e 7.5. Esta análise se dá com o módulo efcs.exe do programa EFCAD [3], onde se utilizou duas condições para os valores de densidade de corrente em carga:

Condição A	Condição B
Fase (1): + 1,30 Ae/mm <sup>2</sup> ;	Fase (1): 0 Ae/mm <sup>2</sup> ;
Fase (2): - 0,65 Ae/mm <sup>2</sup> ;	Fase (2): - 1,13 Ae/mm <sup>2</sup> ;
Fase (3): - 0,65 Ae/mm <sup>2</sup> .	Fase (3): + 1,13 Ae/mm <sup>2</sup> .

Estes valores foram estabelecidos levando-se em conta o fator de enchimento e o valor da densidade de corrente, em módulo, das três fases, ou seja, quando uma fase se apresenta no seu valor máximo (fase 1), as outras duas estão com a metade do seu valor (fase 2 e 3), caracterizando a defasagem existente entre elas como mostra a Figura 7.6.

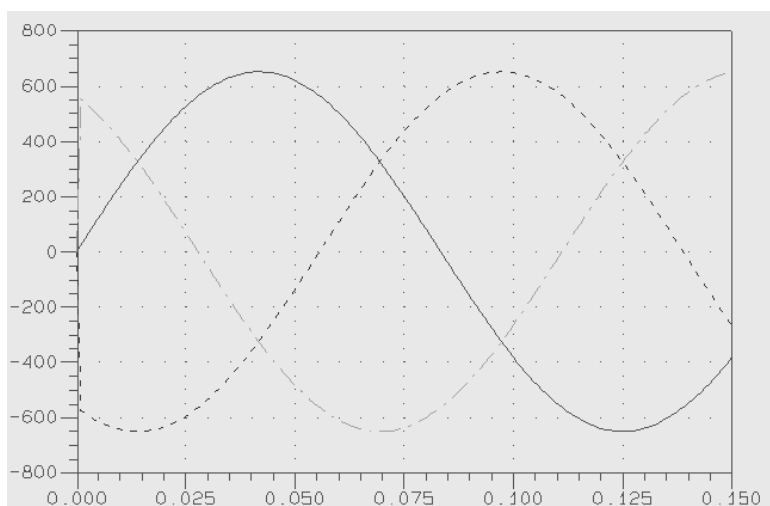


Figura 7.6 – Forma de onda aplicada ao motor

### 7.3 Análise da Simulação Estática

Efetuada o cálculo estático com o módulo efcs.exe, obtêm-se os resultados para análise através do módulo efgn.exe do programa EFCAD [3], onde pode-se visualizar o comportamento das linhas de fluxo magnético, tanto na chapa do rotor quanto na chapa do estator, para os três casos analisados. O módulo efcs.exe usa uma formulação magnetostática bidimensional em potencial vetor magnético. Todas as simulações foram realizadas levando em conta a saturação (análise não-linear).

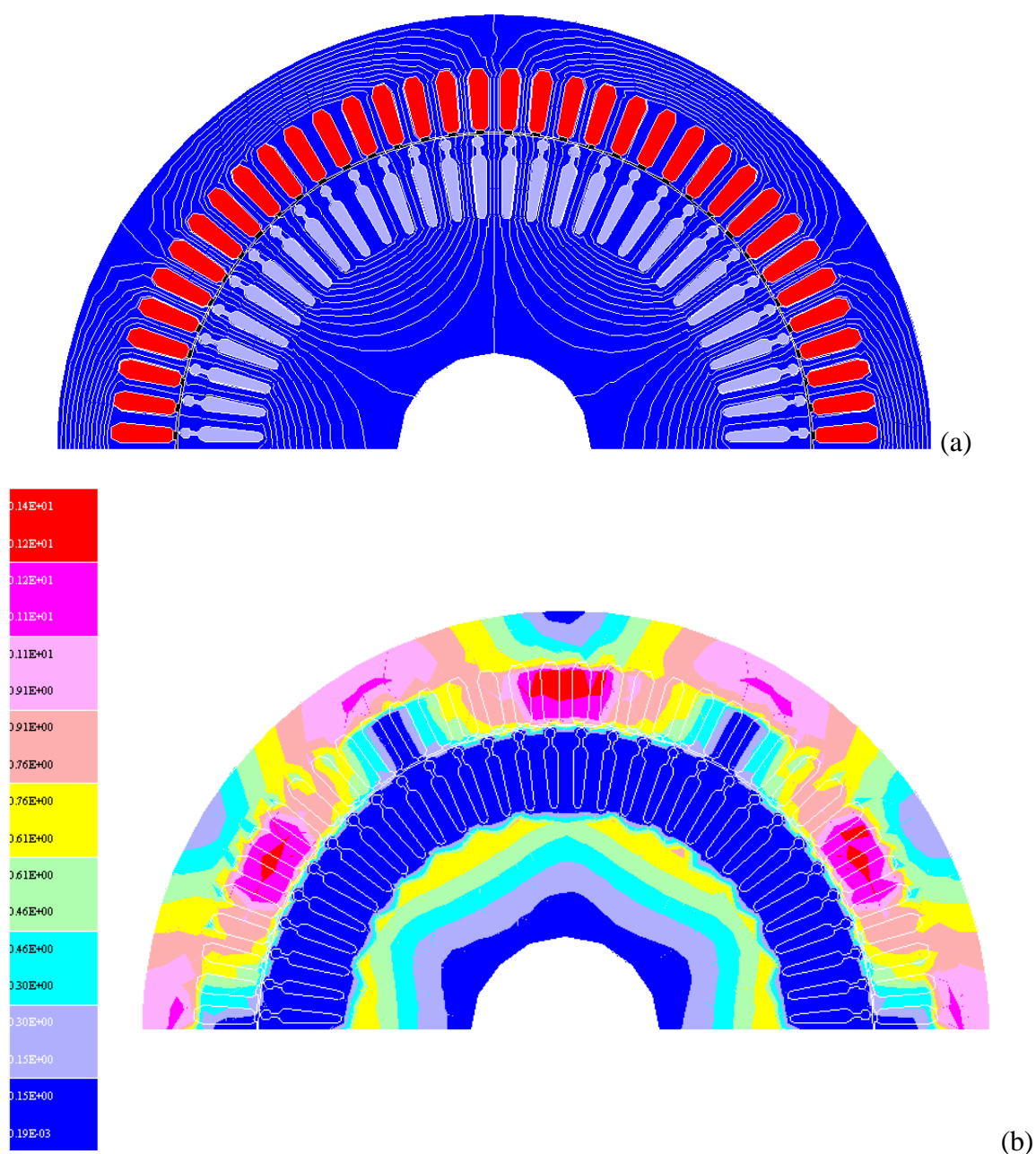


Figura 7.7 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa convencional sem corte econômico (CC): condição A

As Figuras 7.7 e 7.8 mostram a distribuição das linhas de fluxo magnético e a indução magnética para o motor sem cortes considerando a alimentação do motor na condição A e na condição B, respectivamente.

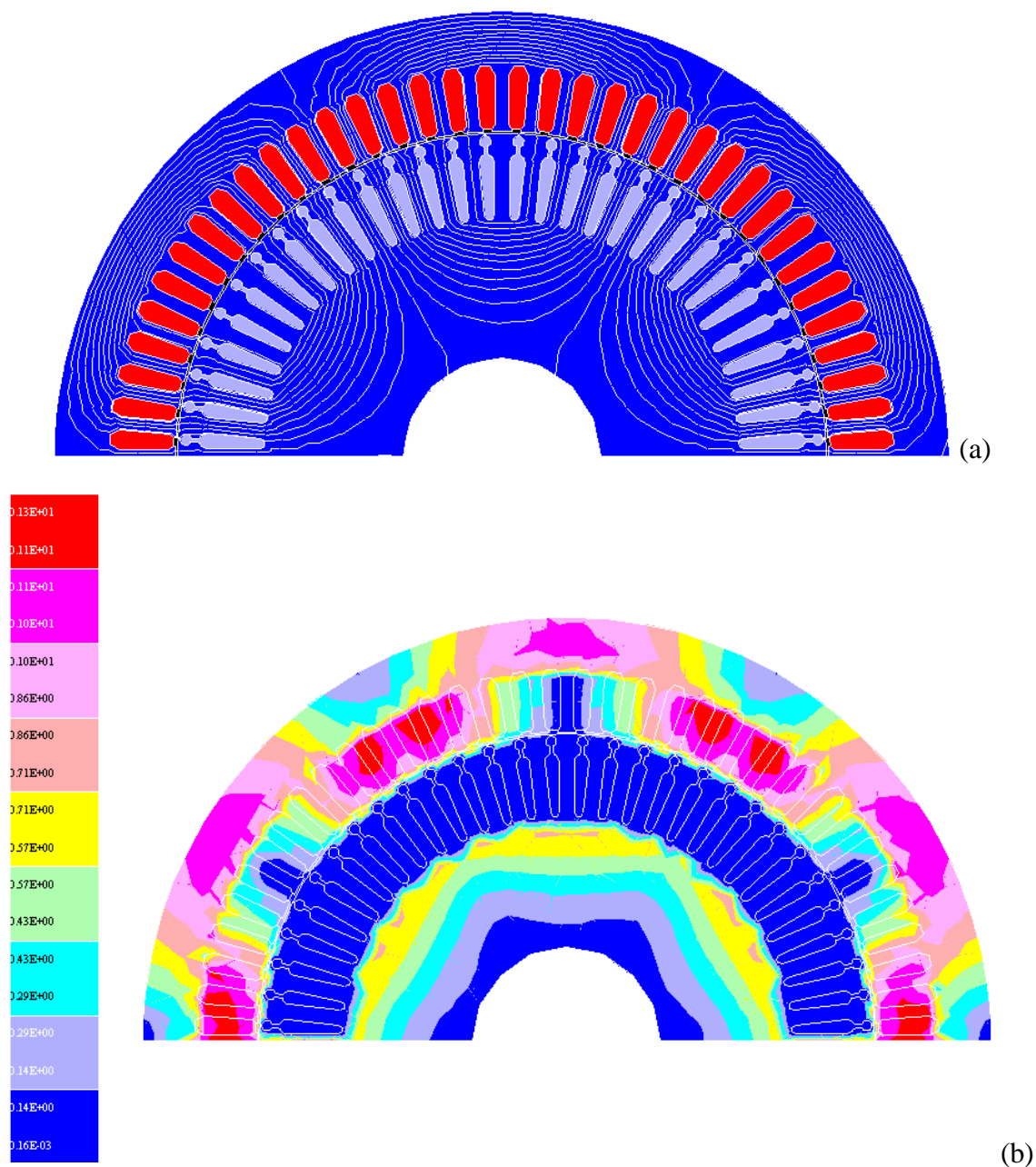


Figura 7.8 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa convencional sem corte econômico (CC): condição B

A seguir, deve-se ter uma atenção especial na região da coroa do estator, onde ocorre a diminuição de sua área devido ao corte econômico. Nesta região ocorre uma concentração maior de linhas de fluxo magnético, indicando assim um aumento da saturação neste ponto da chapa.

A Figura 7.9 mostra a distribuição das linhas de fluxo magnético e a indução magnética para o motor da chapa com corte na largura da tira considerando a alimentação do motor na condição A.

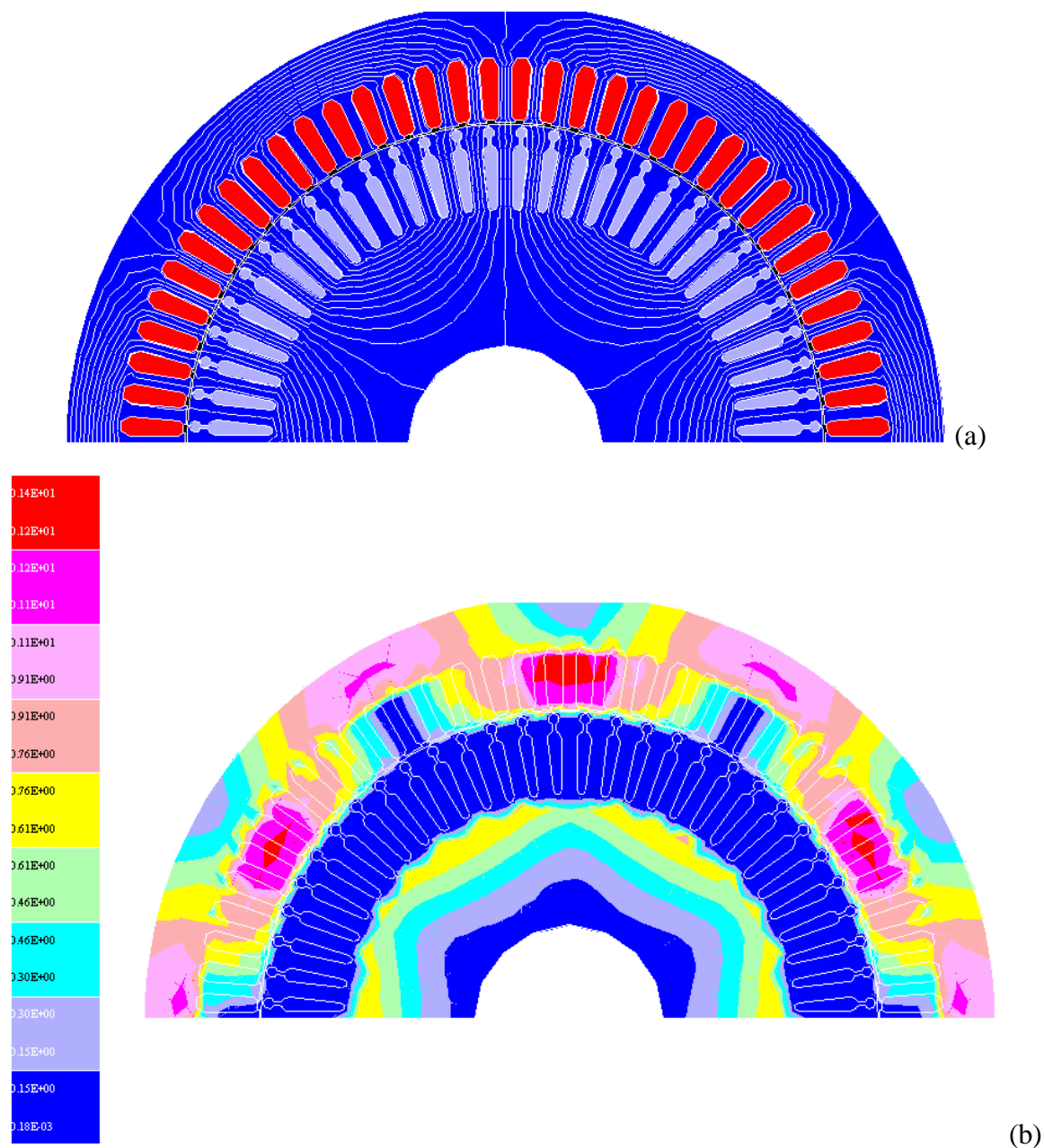


Figura 7.9 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa com corte econômico na largura da tira (CET): condição A

A Figura 7.10 mostra a distribuição das linhas de fluxo magnético e a indução magnética para o motor da chapa com corte na largura da tira considerando a alimentação do motor na condição B.



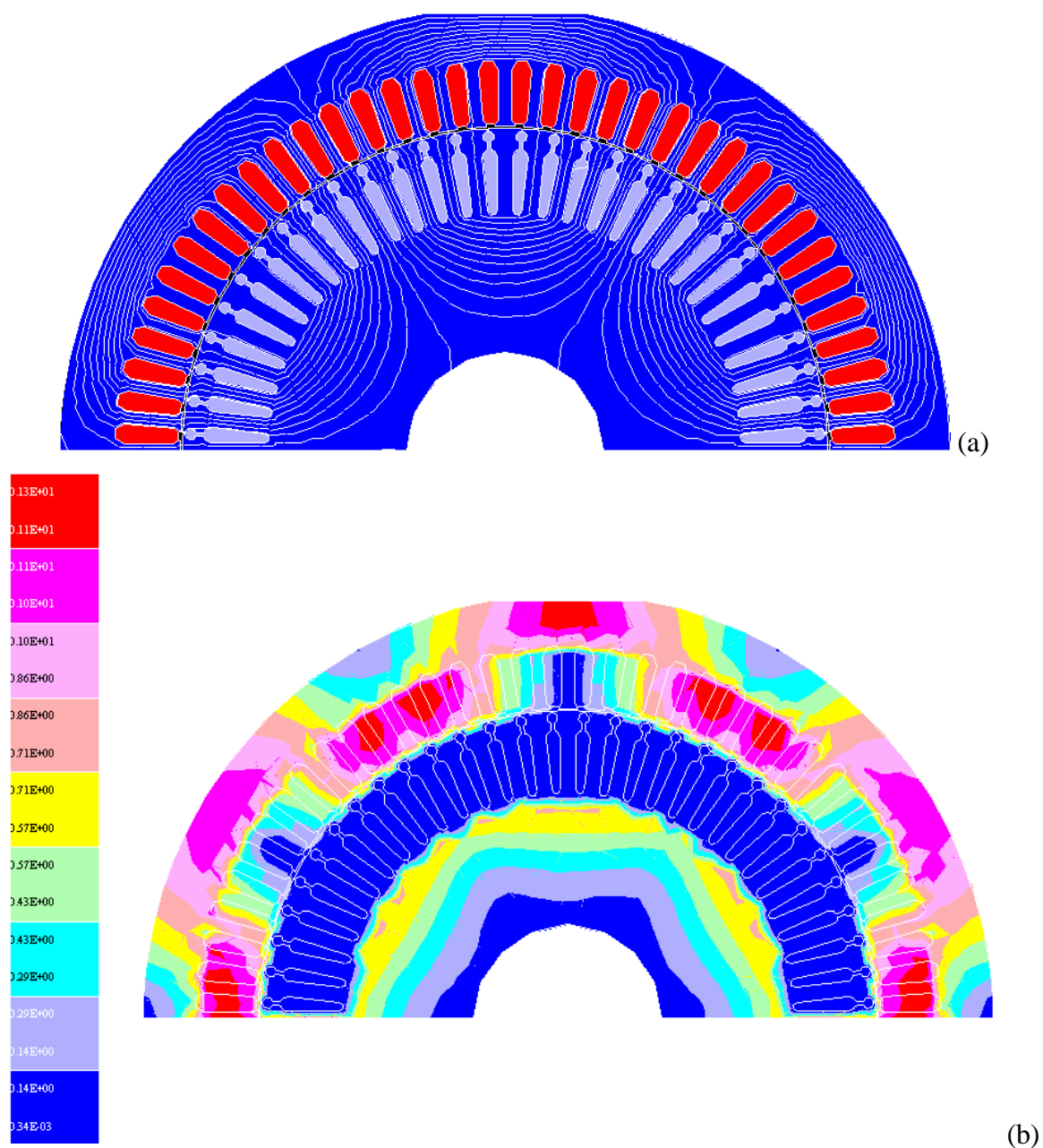


Figura 7.10 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa com corte econômico na largura da tira (CET): condição B

A Figura 7.11 mostra a distribuição das linhas de fluxo magnético e a indução magnética para o motor da chapa com corte na largura da tira e avanço do passo considerando a alimentação do motor na condição A.

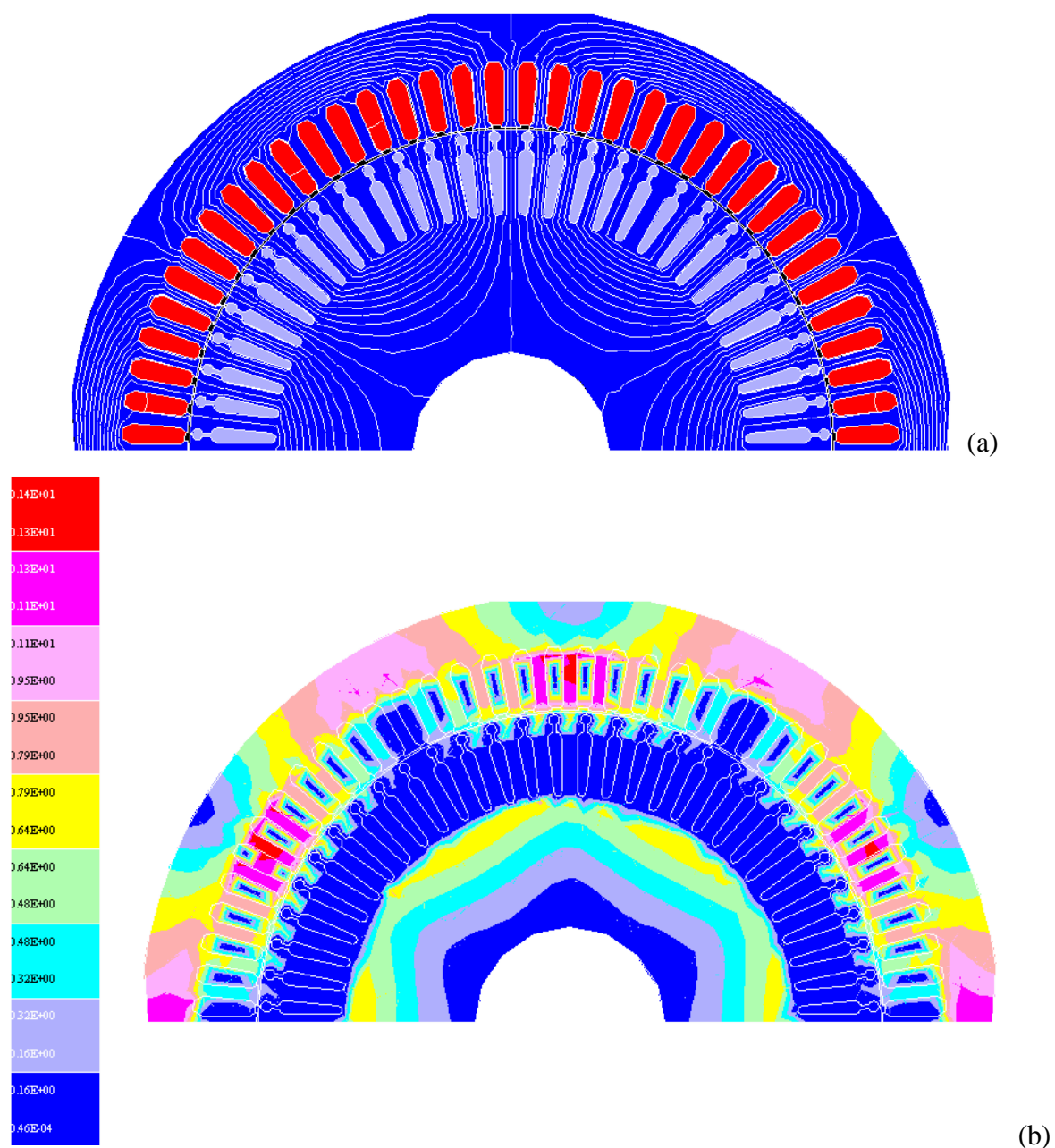


Figura 7.11 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa com corte econômico na largura da tira e avanço do passo (CETP): condição A

A Figura 7.12 mostra a distribuição das linhas de fluxo magnético e a indução magnética para o motor da chapa com corte na largura da tira e avanço do passo considerando a alimentação do motor na condição B.

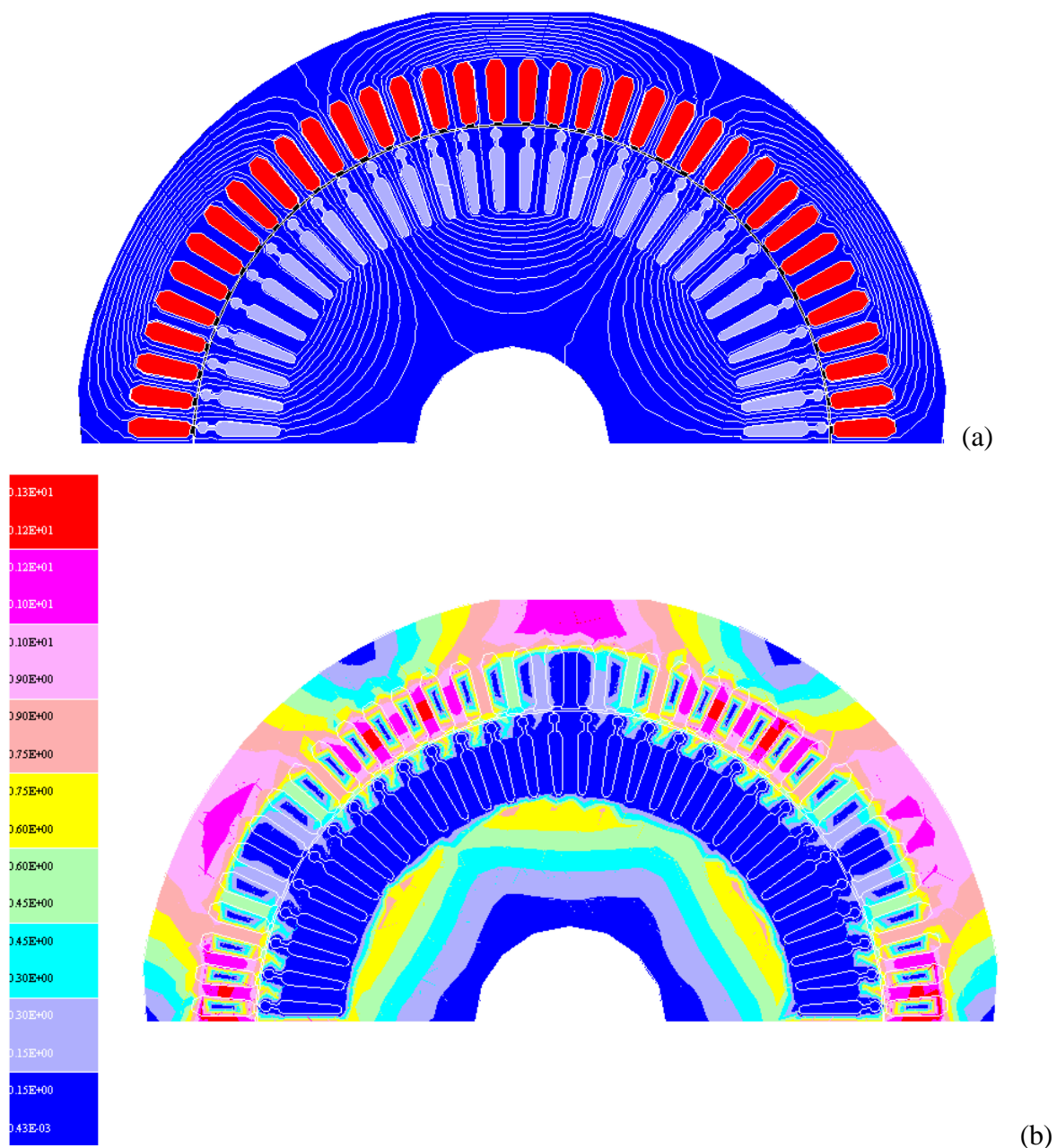


Figura 7.12 – (a) Distribuição das linhas de fluxo magnético e (b) indução magnética na chapa com corte econômico na largura da tira e avanço do passo (CETP): condição B

Os valores máximos das induções magnéticas foram obtidos nas seguintes condições: CC e CET na condição B de alimentação do motor e CETP na condição A de alimentação do motor. Todos os resultados do EFCAD foram obtidos considerando a saturação no ferro (curva da Figura 7.4 e Figura 7.5) e os valores de indução são calculados em cada elemento da malha.

Fazendo-se uso das ferramentas disponíveis no EFCAD [3], obteve-se os valores máximos das induções magnéticas na coroa do estator e rotor, nos dentes do estator e rotor

e no entreferro para as três chapas. Os valores das induções magnéticas na coroa do estator foram obtidos nos pontos mais críticos da coroa (menor área).

**Tabela 7.2 – Simulação no EFCAD dos Valores Máximos das Induções**

Motor 20cv VI pólos carcaça IEC 160L	$B_{co1}$ (T)	$B_{de1}$ (T)	$B_{co2}$ (T)	$B_{de2}$ (T)	$B_{ef}$ (T)
CC	1,120	1,220	0,767	1,100	0,767
CET	1,225	1,220	0,833	1,100	0,767
CETP	1,265	1,300	0,840	1,080	0,845

onde:

$B_{co1}$  é a indução na coroa do estator em [T];

$B_{de1}$  é a indução do dente do estator em [T];

$B_{co2}$  é a indução na coroa do rotor em [T];

$B_{de2}$  é a indução do dente do rotor em [T];

$B_{ef}$  é a indução no entreferro em [T].

Analisando a Tabela 7.2 observa-se que os valores máximos das induções, nas coroas do estator e rotor, apresentaram variações para os três casos; já as induções nos dentes do estator e rotor não variaram para CC e CET, apenas para CETP.

## 8 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para validar o estudo do corte econômico na coroa dos estatores dos motores de indução trifásicos da carcaça 132 a 200, foram ensaiados três motores de indução trifásicos de 20 cv, VI pólos, carcaça IEC 160L, 220/380 V, 60 Hz, linha Standard. Os três estatores apresentavam coroas com diferentes formas geométricas, Motor (CC) - Coroa convencional, Motor (CET) - Coroa com corte econômico na largura da tira e Motor (CETP) - Coroa com corte econômico na largura da tira e avanço do passo. Os três motores compartilharam o mesmo rotor completo. Os motores são mostrados nas Figuras 8.1 e 8.2, respectivamente.



Figura 8.1 – Motor (CC)



Figura 8.2 – Motor (CET) e Motor (CETP)

### 8.1 Ensaios de tipo

Os ensaios de tipo medem todos os valores de desempenho do motor, a vazio, 50% de carga, 75% de carga, nominal (100%), 125 % de carga e com rotor bloqueado, além da temperatura em alguns pontos. Foi aplicado em cada motor três vezes, com objetivo de garantir a repetibilidade dos ensaios. Os ensaios foram feitos num dinamômetro de 10 kW, 400 V, 1080-3600 RPM, conforme Figura 8.3 e Figura 8.4, respectivamente.

A medição da elevação de temperatura do enrolamento ( $\Delta T$ ) [14], é feita pelo método mais preciso e mais confiável de se medir a temperatura de um enrolamento, através da propriedade dos condutores de variarem sua resistência ôhmica com a temperatura [15]. A elevação de temperatura pelo método da resistência é calculada por meio da seguinte equação (8.1), para condutores de cobre:

$$\Delta T = T_2 - T_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + T_1) + T_1 - T_a \quad (8.1)$$

onde:

$\Delta t$  é a elevação de temperatura em [°C];

$T_1$  é a temperatura do enrolamento antes do ensaio em [°C], praticamente a do meio refrigerante;

$T_2$  é a temperatura do enrolamento no fim do ensaio em [°C];

$T_a$  é a temperatura do meio refrigerante no fim do ensaio em [°C];

$R_1$  é a resistência do enrolamento antes do ensaio [•];

$R_2$  é a resistência do enrolamento no fim do ensaio [•].



Figura 8.3 – Dinamômetro



Figura 8.4 – Acoplamento

O  $\Delta T$  especificado para este motor é de 80°C, valor abaixo da sua classe de isolamento F (105°C), vantagem que garante um motor mais frio com conseqüente aumento da sua vida útil.



### 8.1.1 Resultado dos ensaios de tipo

A **Tabela 8.1** apresenta a comparação dos valores de ensaios do motor (CC).

**Tabela 8.1 – Comparação dos valores de ensaios do motor (CC)**

Motor de Indução Trifásico														Data	
														15/04/2008	
IDENTIFICAÇÃO															
Potência: 20 cv				Pol: 6 polos				Tensão: 380 V							
Freq: 60 Hz				Rot: 1170 rpm				Corrente: 32.6 A							
Ensaio	Ensaio em Carga (100% Carga Nominal) - NBR 5383-1 - Var. Método 2								Vazio		Bloqueado			Temperatura	
	Ia(A) *	Cos Ø	N (%)	Pj1(W)	Pj2(W)	Ps(W)	Ptot(W)	RPM	Io(A) *	Po(W)	Cp/Cn	Cm/Cn	Ip/In	DT. Man	DT. Bob
Tab. Valores	32.59	0.78	89.6	-	-	-	-	1170	17.37	750.00	2.60	2.90	7.50	-	80.00
BY98949-01	31.32	0.80	89.8	746.83	368.98	79.46	1680.17	1171	15.73	665.20	2.78	3.04	6.90	-	71.83
BY98949-04	31.27	0.80	89.8	756.09	366.34	74.74	1669.88	1171	15.84	654.80	2.77	3.05	6.81	-	72.04
BY98949-05	31.31	0.80	89.7	752.32	360.24	80.03	1685.64	1172	15.76	673.20	2.77	3.08	6.81	-	69.65
Total de ensaios comparados				- Rotina : 000				Tipo : 003							
Média	31.30	0.80	89.8	751.75	365.19	78.08	1678.56	1171	15.78	664.40	2.77	3.06	6.84	0.00	71.18
Desv. Padrão	0.029	0.000	0.04	4.654	4.486	2.908	8.000	0.3	0.056	9.226	0.002	0.021	0.054	0.000	1.323

A **Tabela 8.2** apresenta a comparação dos valores de ensaios do motor (CET).

**Tabela 8.2 – Comparação dos valores de ensaios do motor (CET)**

Motor de Indução Trifásico														Data 15/04/2008	
IDENTIFICAÇÃO															
Potência: 20 cv				Pol: 6 polos				Tensão: 380 V							
Freq: 60 Hz				Rot: 1170 rpm				Corrente: 32.6 A							
Ensaio	Ensaio em Carga (100% Carga Nominal) - NBR 5383-1 - Var. Método 2								Vazio		Bloqueado			Temperatura	
	Ia(A) *	Cos Ø	N (%)	Pj1(W)	Pj2(W)	Ps(W)	Ptot(W)	RPM	Io(A) *	Po(W)	Cp/Cn	Cm/Cn	Ip/In	DT. Man	DT. Bob
Tab. Valores	32.59	0.78	89.6	-	-	-	-	1170	17.37	750.00	2.60	2.90	7.50	-	80.00
BY98949-02	31.43	0.79	89.9	759.76	363.82	51.05	1655.31	1171	16.02	666.00	2.73	3.08	6.79	-	65.08
BY98949-09	31.35	0.79	89.8	740.83	367.77	62.93	1665.74	1171	15.91	676.80	2.77	3.04	6.79	-	66.53
BY98949-08	31.28	0.80	89.6	753.43	372.80	84.06	1700.61	1171	15.80	671.00	2.78	3.05	6.80	-	69.08
Total de ensaios comparados				- Rotina : 000				Tipo : 003							
Média	31.35	0.79	89.8	751.34	368.13	66.01	1673.89	1171	15.91	671.27	2.76	3.06	6.80	0.00	66.90
Desv. Padrão	0.073	0.004	0.13	9.637	4.501	16.721	23.727	0.3	0.107	5.405	0.026	0.021	0.006	0.000	2.026

A **Tabela 8.3** apresenta a comparação dos valores de ensaios do motor (CETP).

**Tabela 8.3 – Comparação dos valores de ensaios do motor (CETP)**

Motor de Indução Trifásico														Data 15/04/2008	
IDENTIFICAÇÃO															
Potência: 20 cv				Pol: 6 polos				Tensão: 380 V							
Freq: 60 Hz				Rot: 1170 rpm				Corrente: 32.6 A							
Ensaio	Ensaio em Carga (100% Carga Nominal) - NBR 5383-1 - Var. Método 2								Vazio		Bloqueado			Temperatura	
	Ia(A) *	Cos Ø	N (%)	Pj1(W)	Pj2(W)	Ps(W)	Ptot(W)	RPM	Io(A) *	Po(W)	Cp/Cn	Cm/Cn	Ip/In	DT. Man	DT. Bob
Tab. Valores	32.59	0.78	89.6	-	-	-	-	1170	17.37	750.00	2.60	2.90	7.50	-	80.00
BY98949-03	31.45	0.79	89.7	742.95	362.60	62.88	1691.46	1172	15.96	707.10	2.67	3.03	6.74	-	65.33
BY98949-06	31.40	0.80	89.5	747.68	369.04	63.79	1720.89	1171	16.07	719.90	2.66	3.00	6.65	-	74.08
BY98949-07	31.47	0.80	89.5	750.32	368.23	74.10	1728.49	1171	16.00	721.50	2.66	3.02	6.65	-	67.85
Total de ensaios comparados - Rotina : 000 Tipo : 003															
Média	31.44	0.80	89.6	746.98	366.62	66.92	1713.61	1171	16.01	716.17	2.66	3.02	6.68	0.00	69.09
Desv. Padrão	0.034	0.002	0.11	3.735	3.504	6.232	19.557	0.3	0.058	7.893	0.009	0.015	0.052	0.000	4.506

A **Tabela 8.4** apresenta a comparação dos valores de ensaios do motor (CC), motor (CET) e motor (CETP).

**Tabela 8.4 – Comparação dos valores de ensaios do motor (CC), motor (CET) e Motor (CETP)**

Motor de Indução Trifásico														Data 15/04/2008	
IDENTIFICAÇÃO															
Potência: 20 cv				Pol: 6 polos				Tensão: 380 V							
Freq: 60 Hz				Rot: 1170 rpm				Corrente: 32.6 A							
Ensaio	Ensaio em Carga (100% Carga Nominal) - NBR 5383-1 - Var. Método 2								Vazio		Bloqueado			Temperatura	
	Ia(A) *	Cos Ø	N (%)	Pj1(W)	Pj2(W)	Ps(W)	Ptot(W)	RPM	Io(A) *	Po(W)	Cp/Cn	Cm/Cn	Ip/In	DT. Man	DT. Bob
Tab. Valores	32.59	0.78	89.6	-	-	-	-	1170	17.37	750.00	2.60	2.90	7.50	-	80.00
BY98949-01	31.32	0.80	89.8	746.83	368.98	79.46	1680.17	1171	15.73	665.20	2.78	3.04	6.90	-	71.83
BY98949-04	31.27	0.80	89.8	756.09	366.34	74.74	1669.88	1171	15.84	654.80	2.77	3.05	6.81	-	72.04
BY98949-05	31.31	0.80	89.7	752.32	360.24	80.03	1685.64	1172	15.76	673.20	2.77	3.08	6.81	-	69.65
BY98949-02	31.40	0.79	90.0	746.40	360.07	51.60	1638.75	1172	16.02	666.00	2.73	3.08	6.79	-	65.08
BY98949-09	31.35	0.79	89.8	740.83	367.77	62.93	1665.74	1171	15.91	676.80	2.77	3.04	6.79	-	66.53
BY98949-08	31.28	0.80	89.6	753.43	372.80	84.06	1700.61	1171	15.80	671.00	2.78	3.05	6.80	-	69.08
BY98949-03	31.45	0.79	89.7	742.95	362.60	62.88	1691.46	1172	15.96	707.10	2.67	3.03	6.74	-	65.33
BY98949-06	31.40	0.80	89.5	747.68	369.04	63.79	1720.89	1171	16.07	719.90	2.66	3.00	6.65	-	74.08
BY98949-07	31.47	0.80	89.5	750.32	368.23	74.10	1728.49	1171	16.00	721.50	2.66	3.02	6.65	-	67.85
Total de ensaios comparados - Rotina : 000 Tipo : 009															
Média	31.36	0.79	89.7	748.54	366.23	70.40	1686.85	1171	15.90	683.94	2.73	3.04	6.77	0.00	69.05
Desv. Padrão	0.072	0.003	0.15	4.966	4.359	10.629	27.832	0.3	0.121	25.239	0.054	0.026	0.079	0.000	3.158



As Figuras 8.5 e 8.6 representam os gráficos dos valores de ensaios da Corrente a vazio e Corrente nominal do motor (CC), motor (CET) e motor (CETP), respectivamente.

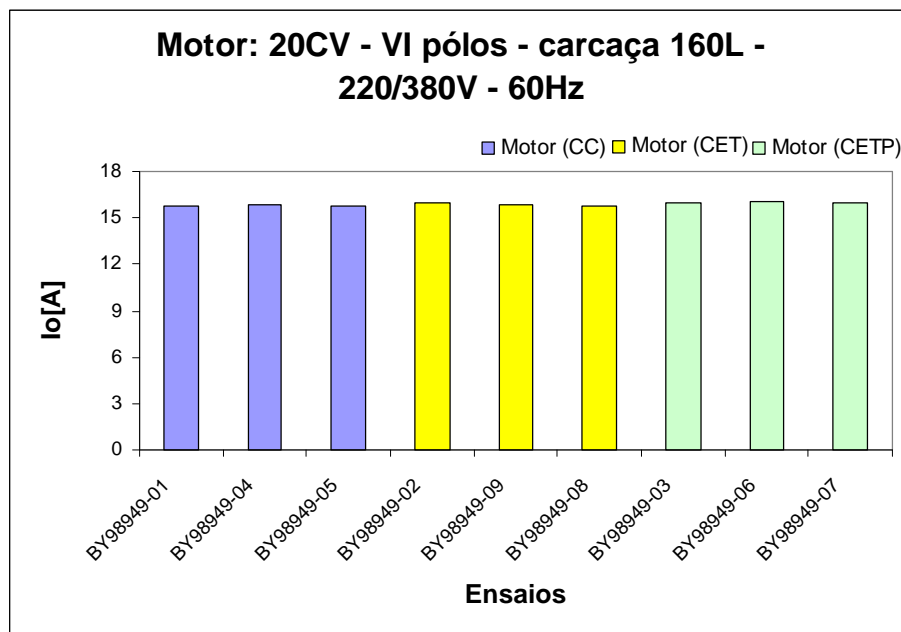


Figura 8.5 – Valores da Corrente a vazio -  $I_o$ [A]

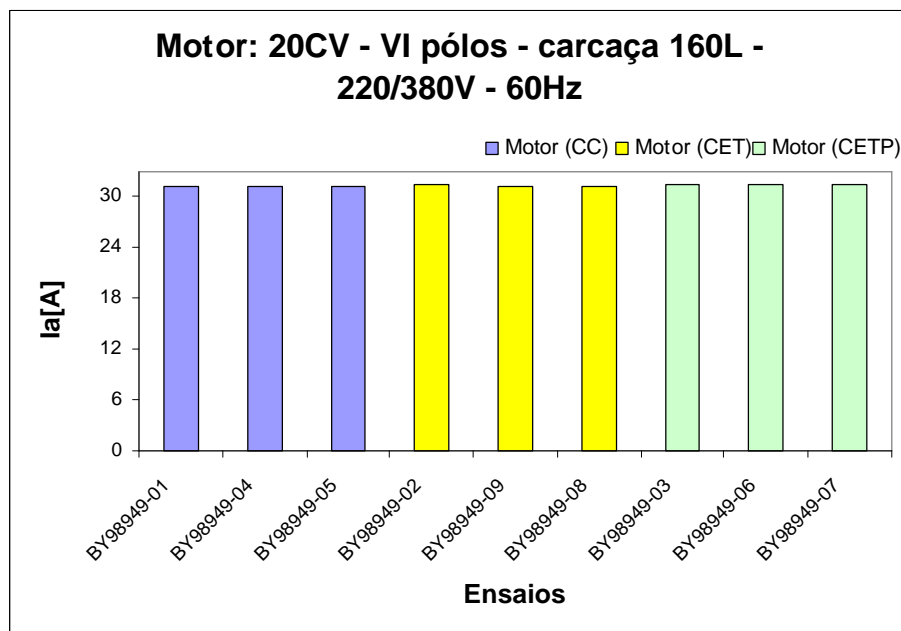


Figura 8.6 – Valores da Corrente nominal -  $I_a$ [A]

É possível perceber pela Figura 8.5 e Figura 8.6 que a Corrente a vazio e Corrente nominal não variaram.

As Figuras 8.7 e 8.8 representam os gráficos dos valores de ensaios das Perdas no ferro e Perdas joule no estator do motor (CC), motor (CET) e motor (CETP), respectivamente.

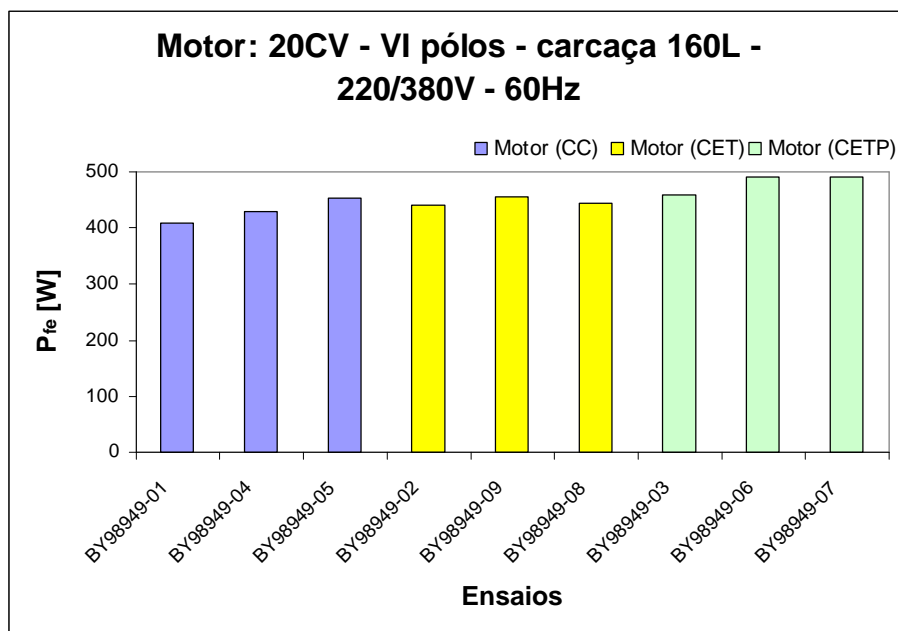


Figura 8.7 – Valores das Perdas no ferro -  $P_{fe}$ [W]

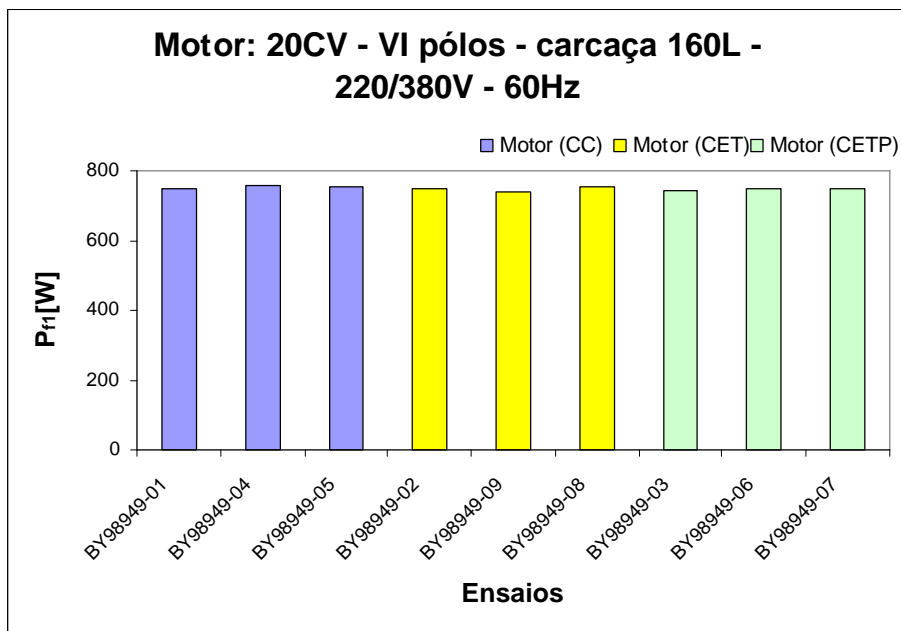


Figura 8.8 – Valores das Perdas Joule no estator -  $P_{fi}$ [W]

É possível observar na Figura 8.7 que as Perdas no ferro tiveram uma pequena variação, pois estão diretamente relacionadas com a área da chapa.

Pela Figura 8.8 percebe-se que as Perdas joule no estator não variaram, em função da quantidade de cobre ser a mesma nos três motores.

As Figuras 8.9 e 8.10 representam, respectivamente, os gráficos dos valores de ensaios de Rendimento e  $\cos \phi$  do motor (CC), motor (CET) e motor (CETP).

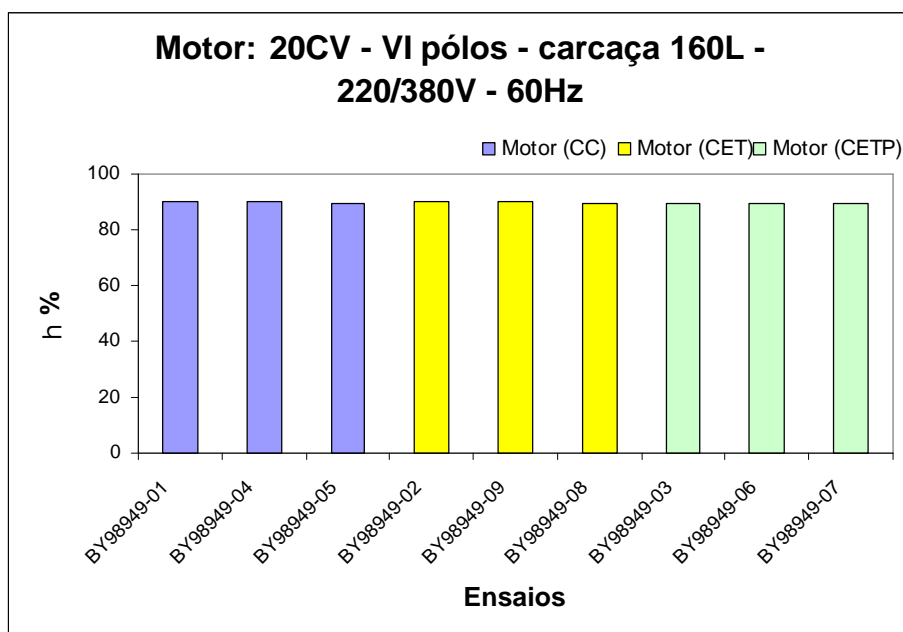


Figura 8.9 – Comparativo dos valores de Rendimento -  $\eta\%$

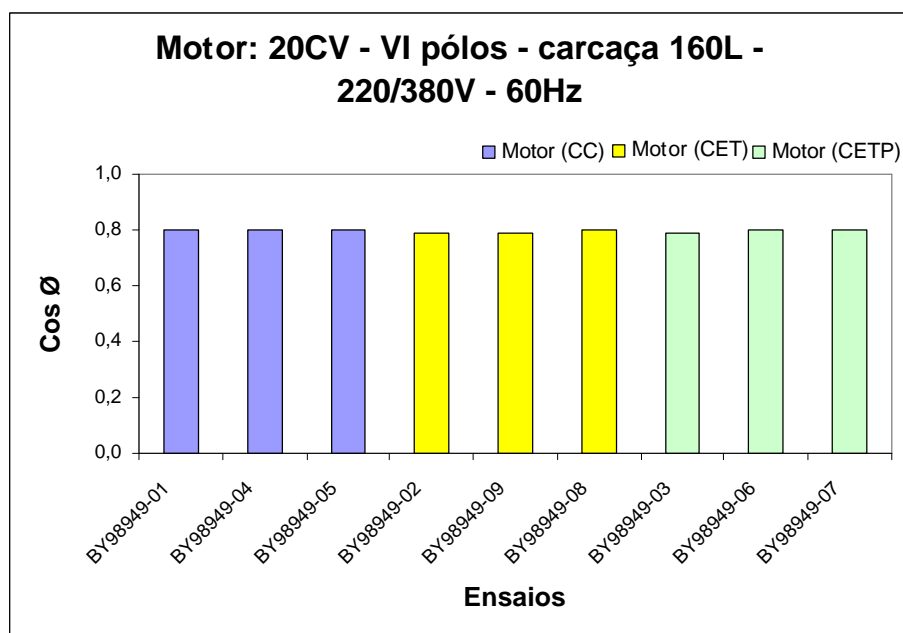


Figura 8.10 – Valores de  $\cos \phi$

É possível observar na Figura 8.9 e Figura 8.10 que o Rendimento e  $\cos \phi$  não variaram.

As Figuras 8.11 e 8.12 representam, respectivamente, os gráficos dos valores de ensaios do Conjugado de partida por Conjugado nominal e do Conjugado máximo por Conjugado nominal do motor (CC), motor (CET) e motor (CETP).

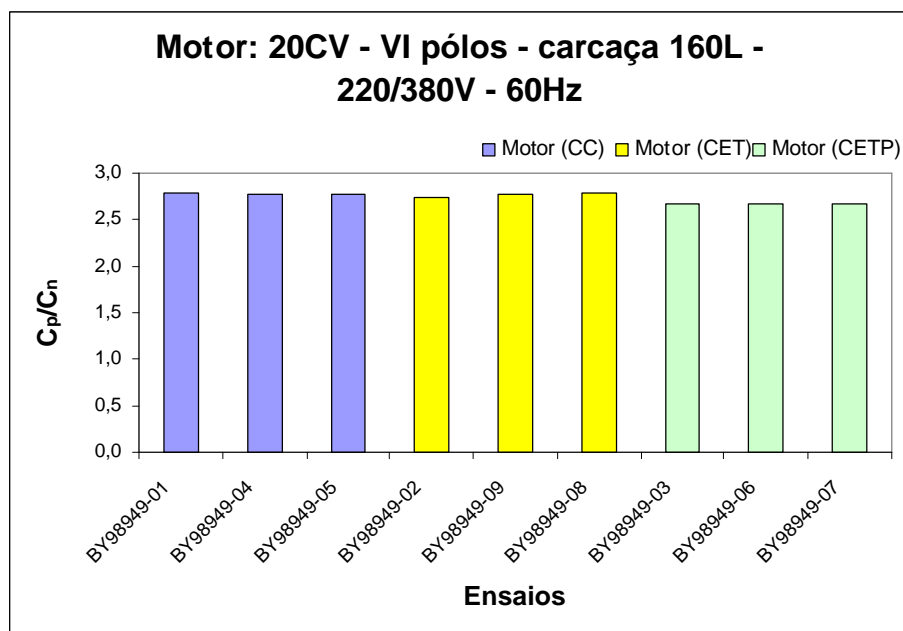


Figura 8.11 – Valores de Conjugado de partida por Conjugado nominal -  $C_p/C_n$

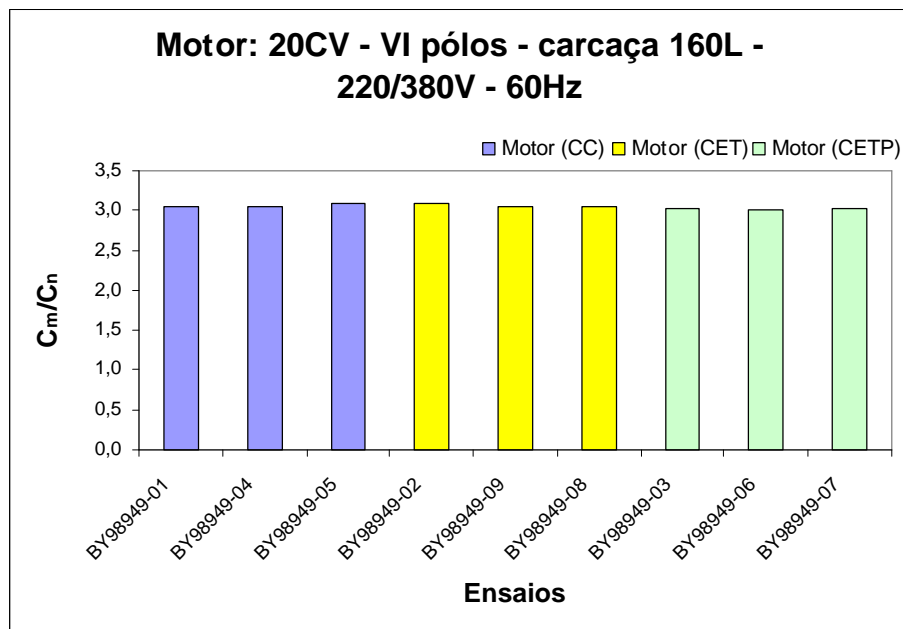


Figura 8.12 – Valores de Conjugado máximo por Conjugado nominal -  $C_m/C_n$

É possível observar na Figura 8.11 e Figura 8.12 que o Conjugado de partida / Conjugado nominal e o Conjugado máximo / Conjugado nominal tiveram uma pequena diminuição.

As Figuras 8.13 e 8.14 representam os gráficos dos valores de ensaios da Corrente de partida por Corrente nominal e do  $\Delta T$  da bobina do motor (CC), motor (CET) e motor (CETP), respectivamente.

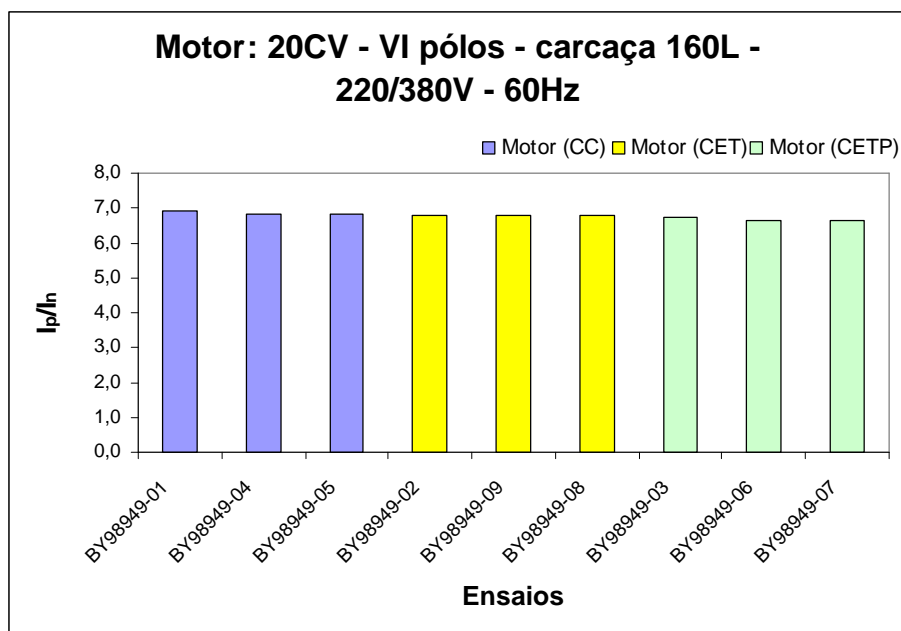


Figura 8.13 – Valores de Corrente de partida por Corrente nominal -  $I_p/I_n$

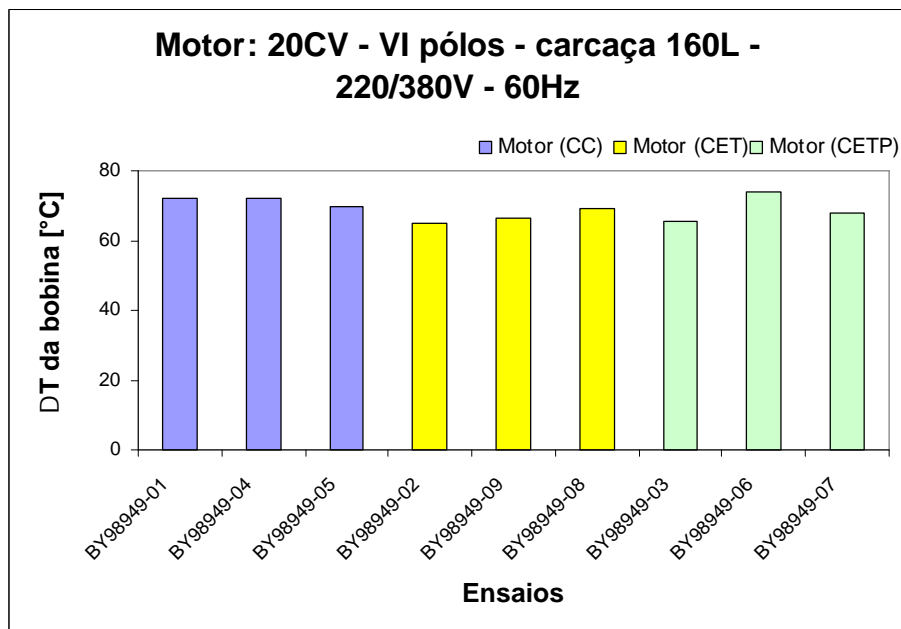


Figura 8.14 – Valores de  $\Delta T$  da bobina [°C]

É possível observar na Figura 8.13 que a Corrente de partida / Corrente nominal não variou.

Pela Figura 8.14 percebe-se que o  $\Delta T$  da bobina variou em função de características intrínsecas ao ensaio.

## 8.2 Ensaaios de vibração

Os ensaios de vibração em base elástica medem o nível de vibração global (faixa de 10 Hz a 1 k Hz) do motor em mm/s RMS, com medição em cinco pontos:

Ponto 1 - ponto horizontal dianteiro;

Ponto 2 - ponto vertical dianteiro;

Ponto 3 - ponto axial dianteiro;

Ponto 4 - ponto horizontal traseiro;

Ponto 5 - ponto vertical traseiro.

Os motores foram ensaiados em base elástica, segundo a norma IEC 60034-14, logo após os ensaios de tipo a vazio com o motor ainda quente. Cada motor foi ensaiado duas vezes, também para garantir a repetibilidade dos ensaios. As Figuras 8.15 e 8.16 ilustram os ensaios realizados.



Figura 8.15 – Ensaio de vibração em base elástica com medição no ponto 2



Figura 8.16 – Ensaio de vibração em base elástica com medição no ponto 5

### 8.2.1 Resultados dos ensaios de vibração em base elástica

Os valores apresentados na **Tabela 8.5** são uma média quadrática dos picos de amplitude das frequências de 10 Hz a 1 k Hz.

**Tabela 8.5 – Análise de severidade de vibração – IEC 60034-14**

Ponto de medição			Velocidade de Vibração (mm/s RMS)						Limites da Norma IEC 60034-14
			Corte convencional		Corte econômico na largura da tira		Corte econômico na largura da tira e avanço do passo		
			Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	
Base Elástica	Global	1	1,46	1,55	1,67	1,70	1,80	1,49	2,20
		2	1,45	1,68	1,66	1,99	1,78	1,45	
		3	0,31	0,74	0,59	0,50	0,85	0,37	
		4	1,22	1,33	1,05	1,26	1,22	1,26	
		5	1,27	1,48	1,07	1,48	1,30	1,23	

Pela **Tabela 8.5** pode-se perceber que todos os valores de ensaio ficaram abaixo dos limites da norma IEC 60034-14.

Os limites de vibração conforme a Norma IEC 60034-14 podem ser encontrados na **Tabela 8.6**.

**Tabela 8.6 – Norma IEC 60034-100****Table 1 – Limits of maximum vibration magnitude in displacement, velocity and acceleration (r.m.s.) for shaft height  $H$** 

Vibration grade	Shaft height, mm	$56 \leq H \leq 132$			$132 < H \leq 280$			$H > 280$		
	Mounting	Displac. $\mu\text{m}$	Vel. mm/s	Acc. $\text{m/s}^2$	Displac. $\mu\text{m}$	Vel. mm/s	Acc. $\text{m/s}^2$	Displac. $\mu\text{m}$	Vel. mm/s	Acc. $\text{m/s}^2$
A	Free suspension	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Rigid mounting	21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Free suspension	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Rigid mounting		—		14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Grade "A" applies to machines with no special vibration requirements.

Grade "B" applies to machines with special vibration requirements. Rigid mounting is not considered acceptable for machines with shaft heights less than 132 mm.

The interface frequencies for displacement/velocity and velocity/acceleration are 10 Hz and 250 Hz respectively.

NOTE 1 The manufacturer and the purchaser should take into account that the instrumentation can have a measurement tolerance of  $\pm 10\%$ .

NOTE 2 The shaft height of a machine without feet, or a machine with raised feet, or any vertical machine is to be taken as the shaft height of a machine in the same basic frame, but of the horizontal shaft foot-mounting type.

### 8.3 Ensaaios de ruído

O ensaio de ruído é realizado em câmara semi-anecóica seguindo os critérios da norma ISO 1680.

O procedimento prático [16] adotado para avaliação do ruído do motor é:

- Medir o Nível de Pressão Sonora ( $L_{Pi}$ ) em cada ponto padronizado de medição em torno do motor no interior da câmara com o motor ligado (a 1 m de distância do motor);
- Medir o Nível de Pressão Sonora ( $L_{Pfi}$ ) do ruído de fundo em cada ponto padronizado de medição em torno do motor no interior da câmara com o motor desligado (a 1m de distância do motor);
- Descontar do ruído do motor ( $L_{Pi}$ ) em cada ponto, os respectivos ruídos de fundo ( $L_{Pfi}$ ), se necessário, ou seja, se a diferença entre o ruído medido e o ruído de fundo for inferior a 10 dB(A);
- Obter o valor médio do Nível de Pressão Sonora a partir dos Níveis de Pressão Sonora corrigidos em todos os pontos de medição;
- Obter o Nível de Potência Sonora do motor a partir do conhecimento do Nível Médio de Pressão Sonora e da área superficial imaginária de medição em torno do motor (norma ISO 1680). A Figura 8.17 ilustra os ensaios realizados.

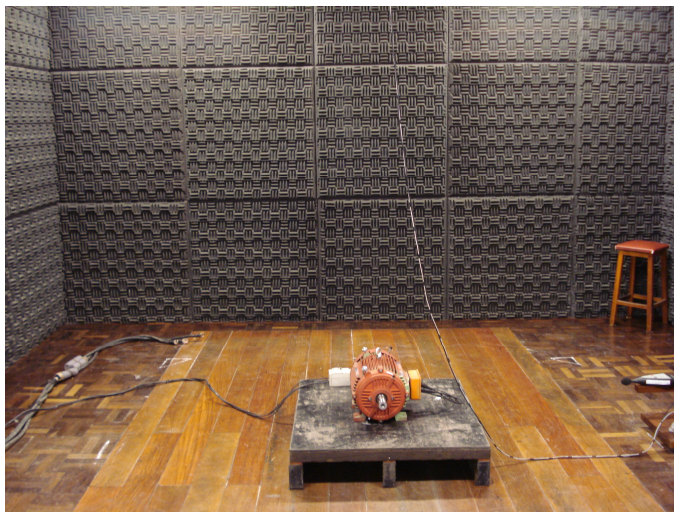


Figura 8.17 – Motor no interior da câmara semi-anecóica



### 8.3.1 Resultados dos ensaios de ruído

Os valores dos Níveis de Potência Sonora são apresentados na **Tabela 8.7**.

**Tabela 8.7 – Valores dos Níveis de Potência Sonora - ISO 1680**

Nível de Potência Sonora dB(A)	Corte convencional	Corte econômico na largura da tira	Corte econômico na largura da tira e avanço do passo	Limites da Norma IEC 60034-09
	74,1	72,5	75,9	84

### 8.4 Análise geral dos resultados

Os resultados das comparações e gráficos originados dos ensaios de tipo mostram que os valores das grandezas relacionadas ao desempenho dos motores como:  $I_0$ ,  $I_n$ ,  $P_{fe}$ ,  $P_{jl}$ ,  $\eta\%$ ,  $\cos \phi$ ,  $C_p/C_n$ ,  $C_{m\acute{a}x}/C_n$  e  $I_p/I_n$ , tiveram incrementos muito pequenos, desprezíveis, que não afetam de maneira significativa na validação do estudo do corte econômico.

Dentre as grandezas, a que teve o aumento mais evidenciado foi a das Perdas no ferro ( $P_{fe}$ ) em função de estar relacionada diretamente a área de chapa, com a diminuição da área pelos cortes econômicos esta grandeza também diminuiu.

O Rendimento ( $\eta\%$ ) que reflete diretamente o desempenho do motor deveria diminuir em função das Perdas no ferro que tiveram um pequeno aumento, mas isto não aconteceu. Este fato se deve a características intrínsecas ao ensaio na etapa de separação de perdas.

O  $\Delta T$  da bobina dos três motores ensaiados apresentou variações aceitáveis abaixo do  $\Delta T$  especificado na placa deste motor ( $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ ). Uma análise térmica mais detalhada não se faz necessária em virtude das pequenas variações de temperatura e da dimensão do corte econômico [17].

Os resultados dos ensaios de vibração em base elástica mostram que, em geral, não é possível afirmar que o corte econômico nas chapas dos estatores dos motores ensaiados provocou alguma modificação no sistema com relação à vibração.

Os valores dos Níveis de Potência Sonora dos motores ensaiados com corte econômico ficaram próximos ao do motor com corte convencional. Ficando todos os valores de ensaio abaixo dos limites da Norma IEC 60034-09.

## 9 CONCLUSÃO

A implantação do corte econômico nas lâminas dos estatores dos motores de indução trifásicos produzidos na WEG trará uma redução considerável em uma das matérias primas mais utilizadas no processo de fabricação de motores – o aço elétrico, sem comprometimento do desempenho. Conseqüentemente, haverá uma diminuição da sucata gerada no processo de estampagem e significativa redução de peso do produto acabado.

Baseado no corte econômico existente nos motores de indução monofásicos e em alguns motores de indução trifásicos de pequenas carcaças foi definido uma dimensão de corte de 2 mm para cada lateral da tira e 2 mm no avanço do passo.

O valor de corte econômico praticado (2 mm) não teve influência significativa sobre o desempenho dos motores ensaiados. Entretanto, valores acima deste poderão ser prejudiciais ao desempenho do motor devido ao aumento da saturação na região de corte da coroa do estator. Além disso, os valores acima do sugerido poderão provocar também o aumento da indução na coroa do estator e das perdas no ferro, pois estas grandezas estão diretamente relacionadas com a área de chapa disponível na coroa do estator. Quanto maior a altura da coroa do estator menor é a influência do corte econômico.

Caso a retirada de material magnético na região da chapa do estator seja excessiva, será criado um espaço de ar adicional ainda maior entre o pacote de chapas do estator e a carcaça devido à diminuição da área de contato entre as partes, gerando assim uma resistência a passagem do fluxo de calor.

A economia gerada devido à redução de aço elétrico justifica o investimento em estampas, necessitando programar a substituição antecipada ou reforma dos estampas em função do RSCI (Retorno Sobre Capital Investido). O RSCI relaciona o custo do investimento em ferramental com o valor da economia mensal obtida com a redução de matéria prima.

Todas as etapas do processo de fabricação foram analisadas através dos protótipos de alguns motores, sob as condições mais críticas, sendo que foram apresentadas soluções para todos os problemas detectados durante o processo de fabricação. Desta forma, todas as fábricas estão aptas a produzirem os motores com corte econômico.

A implantação ocorrerá em todas as chapas das carcaças 132 a 200, alterando o número de grampos de seis para oito. Também será implantado nas chapas da carcaça 112

que ainda não contemplam o corte econômico, permanecendo o mesmo número de grampos (quatro).

As máquinas de grampear existentes (seis grampos) utilizadas na formação dos pacotes de chapas do estator serão substituídas, uma a uma, à medida que as chapas forem modificadas e transferidas para as máquinas novas (oito grampos).

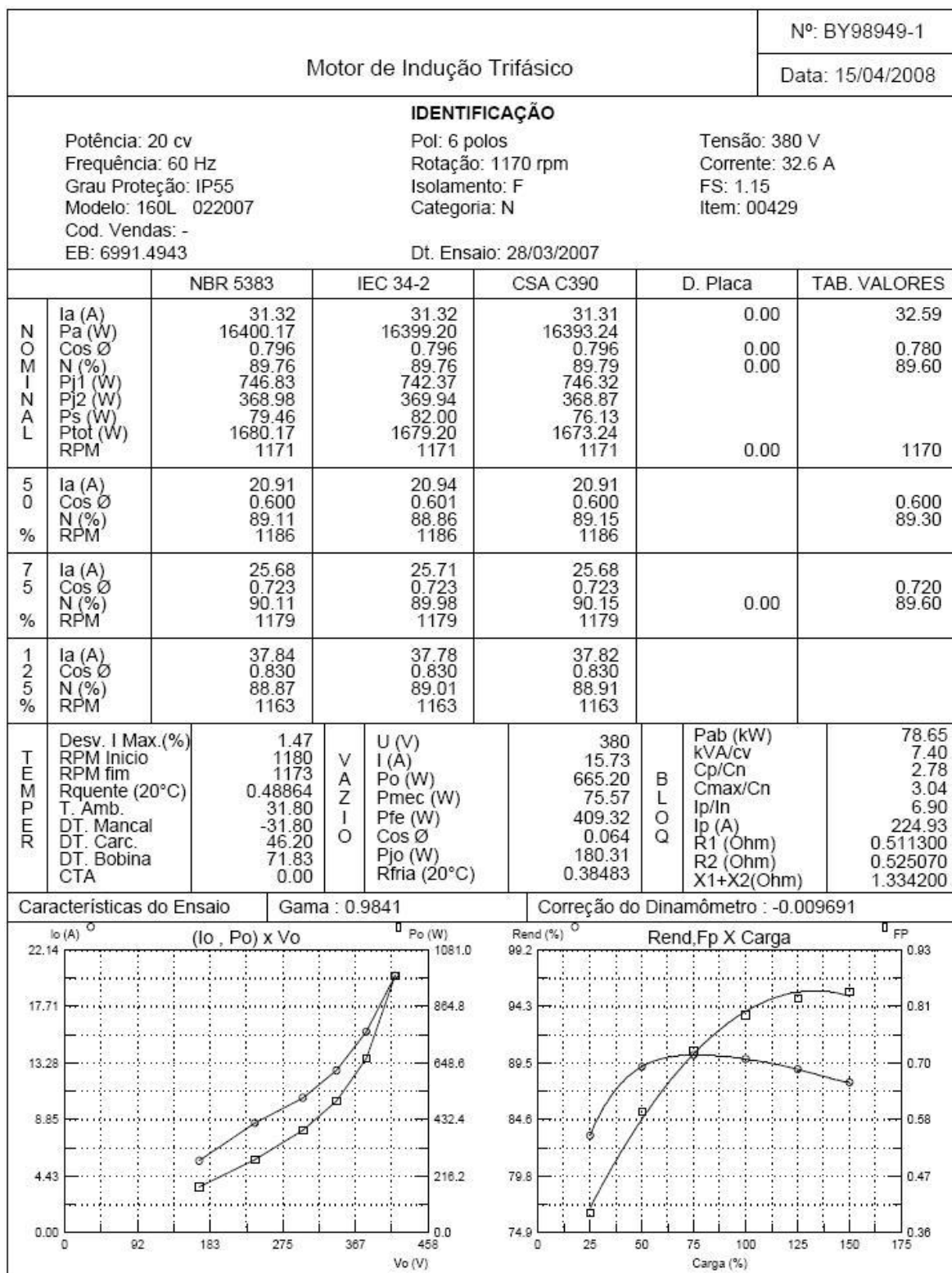
Finalmente, quando um projeto de uma chapa da carcaça 112 a 200 for criado ou modificado, deverá se verificar junto aos projetistas se o corte econômico esta sendo utilizado, otimizando ainda mais o projeto com a redução de material magnético.

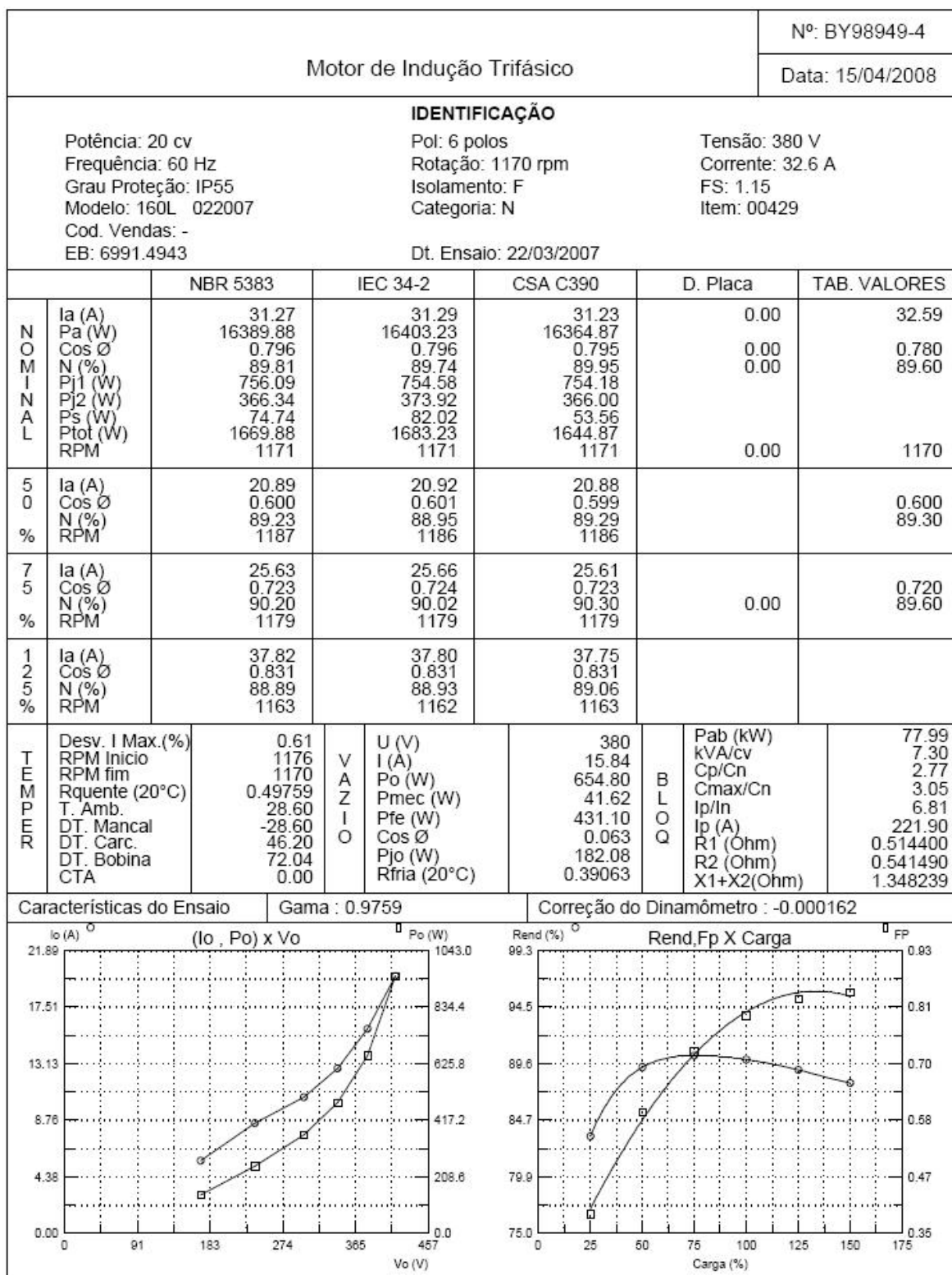
### **9.1 Sugestões para trabalhos futuros**

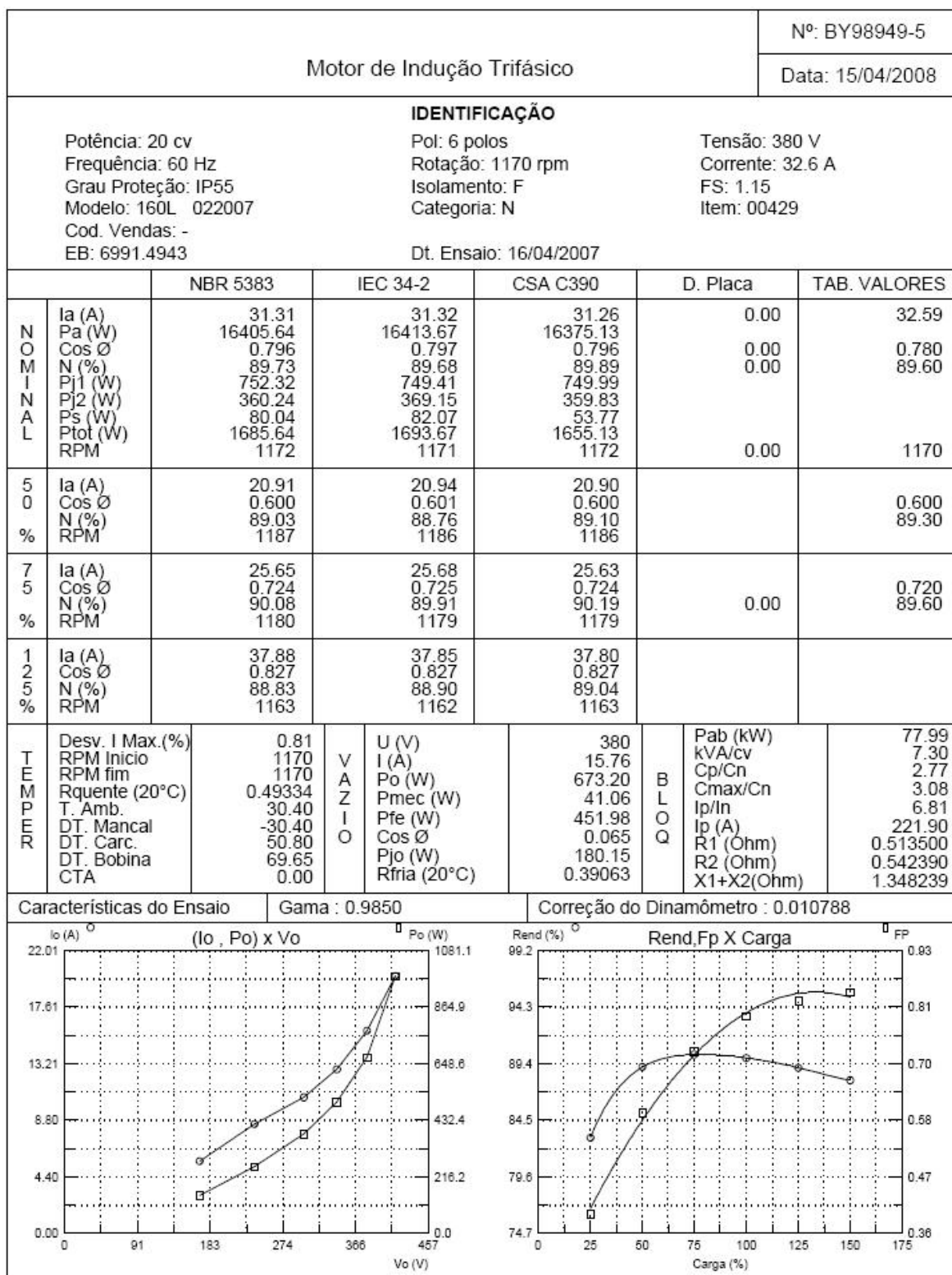
Alguns temas não puderam ser abordados nesta dissertação, mas certamente poderão ser estudados futuramente, com objetivo de aprimorar a qualidade dos estudos e resultados obtidos. Dentre os assuntos, os mais importantes são:

1. Determinar a dimensão do corte econômico ótimo para cada carcaça de modo que não influencie no desempenho dos motores de indução trifásicos.
2. Determinar a influência do corte econômico também para as carcaças 225, 250, 280, 315, 315B e 355.
3. Desenvolver uma análise térmica para os motores de indução trifásicos que utilizarem dimensões de cortes econômicos maiores que o valor usado no estudo (2 mm).
4. Desenvolver um projeto de carcaça que tenha o mesmo formato do pacote de chapas do estator com corte econômico, ou seja, não totalmente circular e que mantenha o contato entre o estator e a carcaça em toda superfície.
5. Fazer uma análise magnetodinâmica pelo método de elementos finitos do motor de indução trifásico levando em conta a inclinação das ranhuras.

## **ANEXO 1 – ENSAIOS DE TIPO**







Nº: BY98949-2

Motor de Indução Trifásico

Data: 15/04/2008

IDENTIFICAÇÃO

Potência: 20 cv  
Frequência: 60 Hz  
Grau Proteção: IP55  
Modelo: 160L 022007  
Cod. Vendas: -  
EB: 6991.4943

Pol: 6 polos  
Rotação: 1170 rpm  
Isolamento: F  
Categoria: N

Tensão: 380 V  
Corrente: 32.6 A  
FS: 1.15  
Item: 00429

Dt. Ensaio: 04/04/2007

		NBR 5383	IEC 34-2	CSA C390	D. Placa	TAB. VALORES	
N O M I N A L	Ia (A)	31.40	31.45	31.39	0.00	32.59	
	Pa (W)	16360.10	16394.10	16348.60			
	Cos Ø	0.790	0.791	0.790	0.00	0.780	
	N (%)	89.98	89.79	90.04	0.00	89.60	
	Pj1 (W)	745.16	744.48	744.30			
	Pj2 (W)	362.07	366.97	361.92			
	Ps (W)	52.19	81.97	42.12			
	Ptot (W)	1640.10	1674.10	1628.60			
	RPM	1172	1171	1172	0.00	1170	
5 0 %	Ia (A)	21.07	21.11	21.07			
	Cos Ø	0.594	0.595	0.594		0.600	
	N (%)	89.20	88.87	89.23		89.30	
	RPM	1186	1186	1186			
7 5 %	Ia (A)	25.80	25.84	25.79	0.00	0.720	
	Cos Ø	0.719	0.720	0.719		89.60	
	N (%)	90.27	90.01	90.31			
	RPM	1179	1179	1179			
1 2 5 %	Ia (A)	37.90	37.93	37.86			
	Cos Ø	0.828	0.828	0.828			
	N (%)	89.14	89.03	89.23			
	RPM	1163	1163	1163			
T E M P E R	Desv. I Max.(%)	0.95	V A Z I O	U (V)	380	Pab (kW)	77.41
	RPM Inicio	1176		I (A)	16.02	kVA/cv	7.28
	RPM fim	1170		Po (W)	666.00	Cp/Cn	2.73
	Rquente (20°C)	0.48592		Pmec (W)	40.45	Cmax/Cn	3.08
	T. Amb.	30.20		Pfe (W)	440.23	Ip/In	6.79
	DT. Mancal	-30.20		Cos Ø	0.063	Ip (A)	221.37
	DT. Carc.	44.20		Pjo (W)	185.32	R1 (Ohm)	0.505400
	DT. Bobina	65.08		Rfria (20°C)	0.39003	R2 (Ohm)	0.547710
	CTA	0.00				X1+X2(Ohm)	1.355630

Características do Ensaio

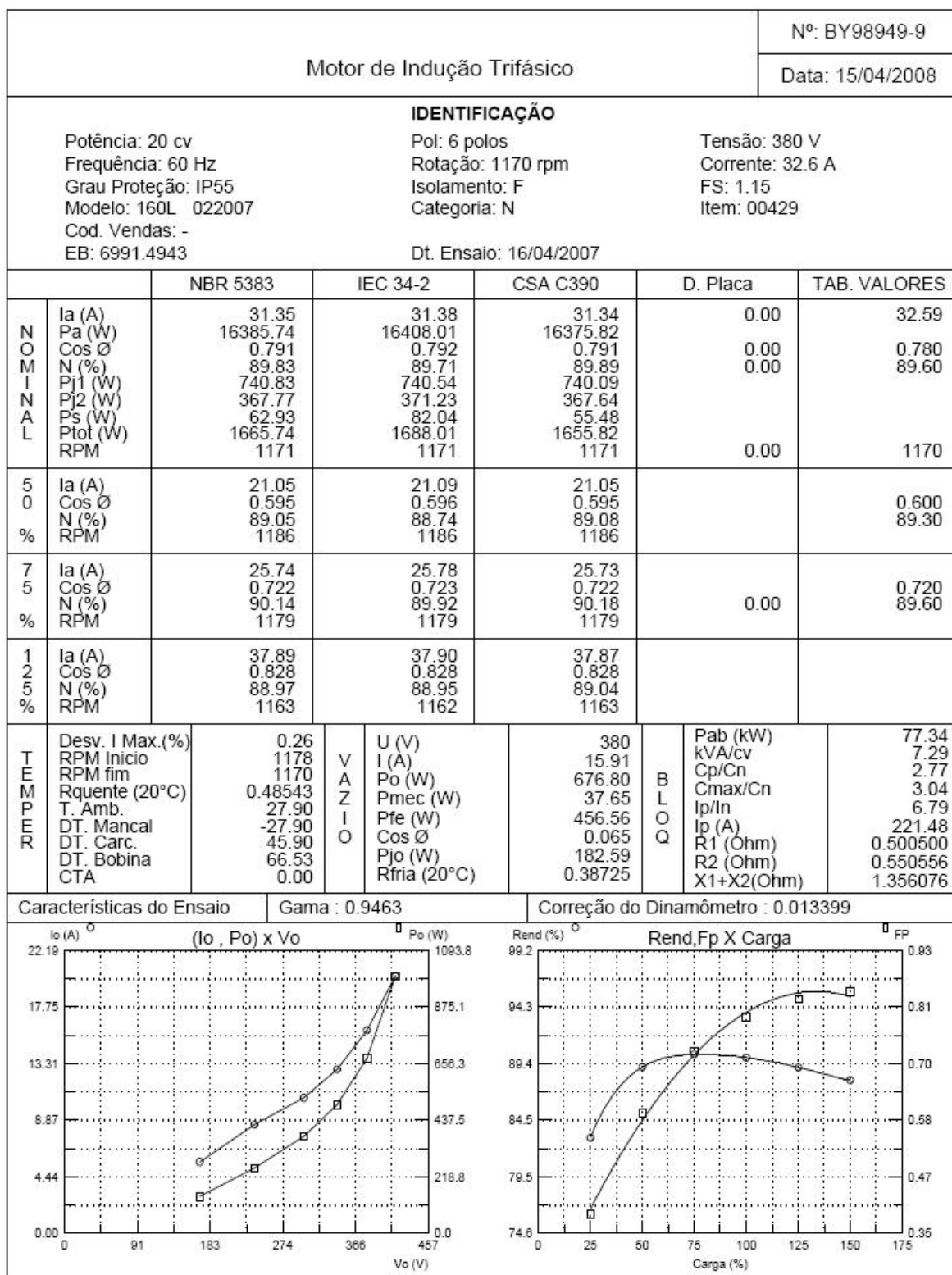
Gama : 0.9497

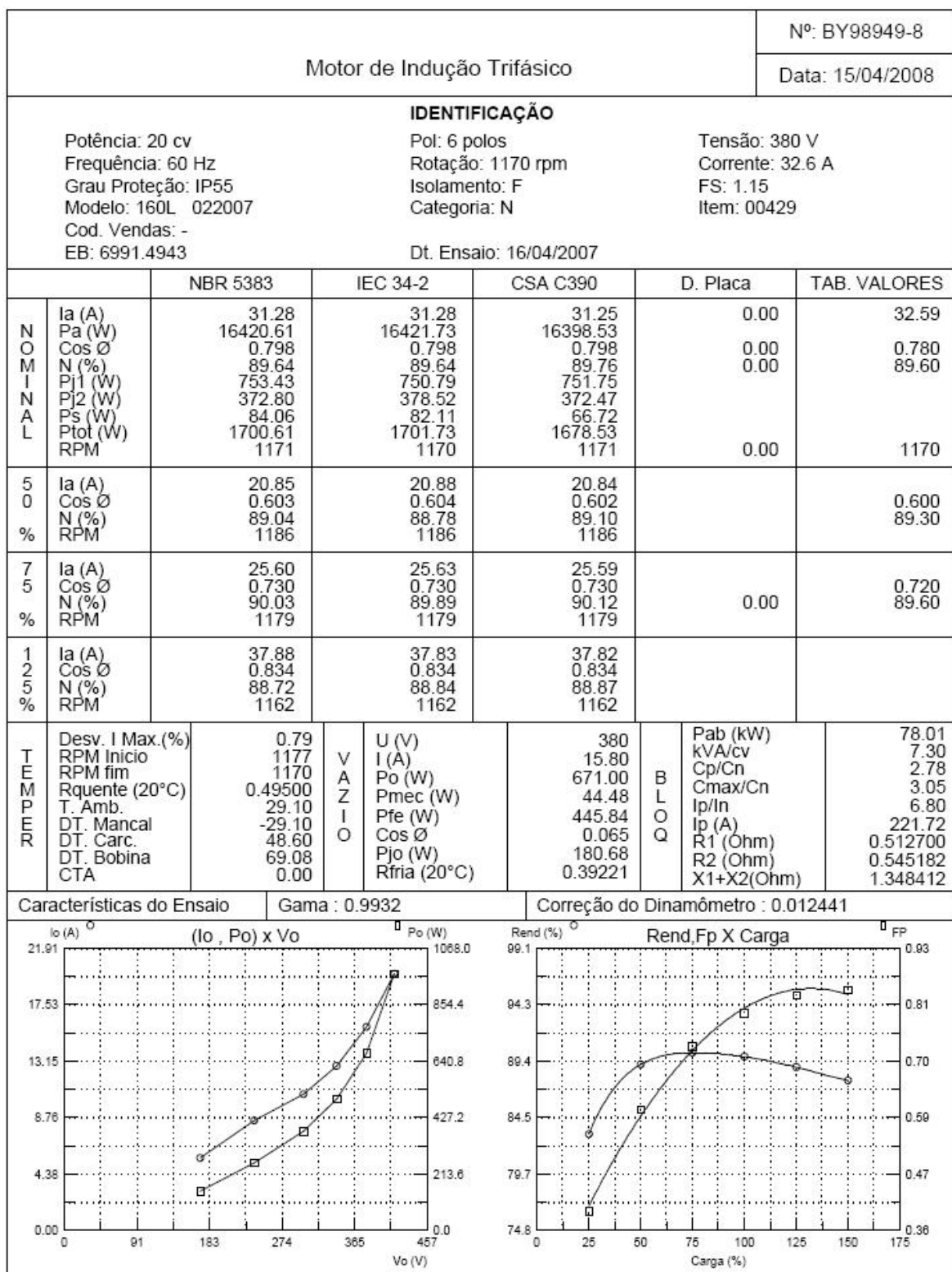
Correção do Dinamômetro : 0.009998

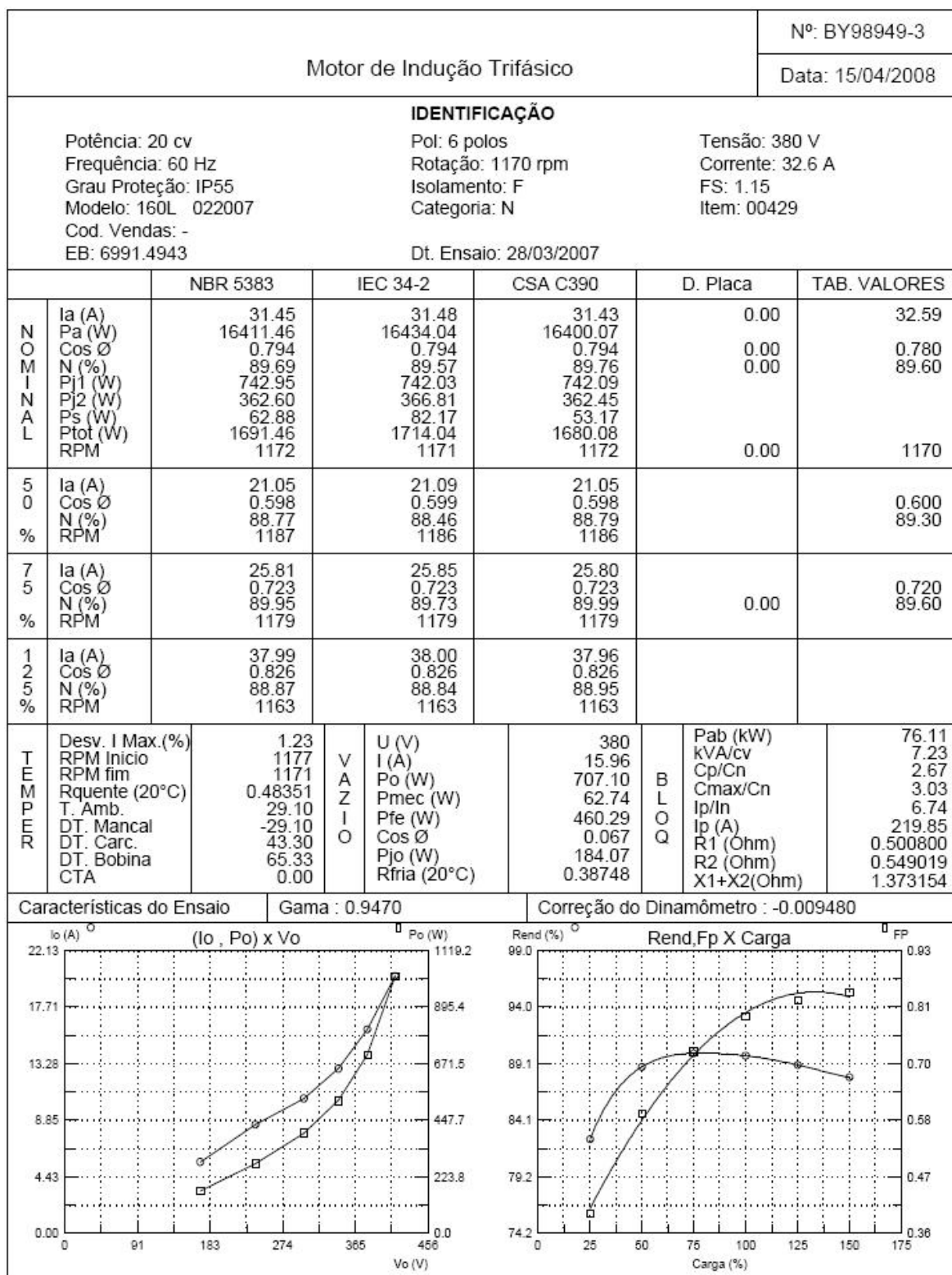
Graph showing the relationship between supply voltage ( $V_o$ ) and input current ( $I_o$ ) and input power ( $P_o$ ). The x-axis represents  $V_o$  (V) from 0 to 456. The left y-axis represents  $I_o$  (A) from 0.00 to 22.18. The right y-axis represents  $P_o$  (W) from 0.0 to 1066.3. The  $I_o$  curve (circles) starts at approximately 4.44 A at 183 V and increases to 22.18 A at 456 V. The  $P_o$  curve (squares) starts at approximately 213.3 W at 183 V and increases to 1066.3 W at 456 V.

Graph showing the relationship between load percentage (Carga (%)) and efficiency (Rend (%)) and power factor (FP). The x-axis represents Carga (%) from 0 to 175. The left y-axis represents Rend (%) from 74.9 to 99.3. The right y-axis represents FP from 0.35 to 0.92. The Rend curve (circles) starts at approximately 79.8% at 25% load and increases to a peak of about 90.6% at 100% load, then slightly decreases. The FP curve (squares) starts at approximately 0.47 at 25% load and increases to a peak of about 0.81 at 125% load, then slightly decreases.





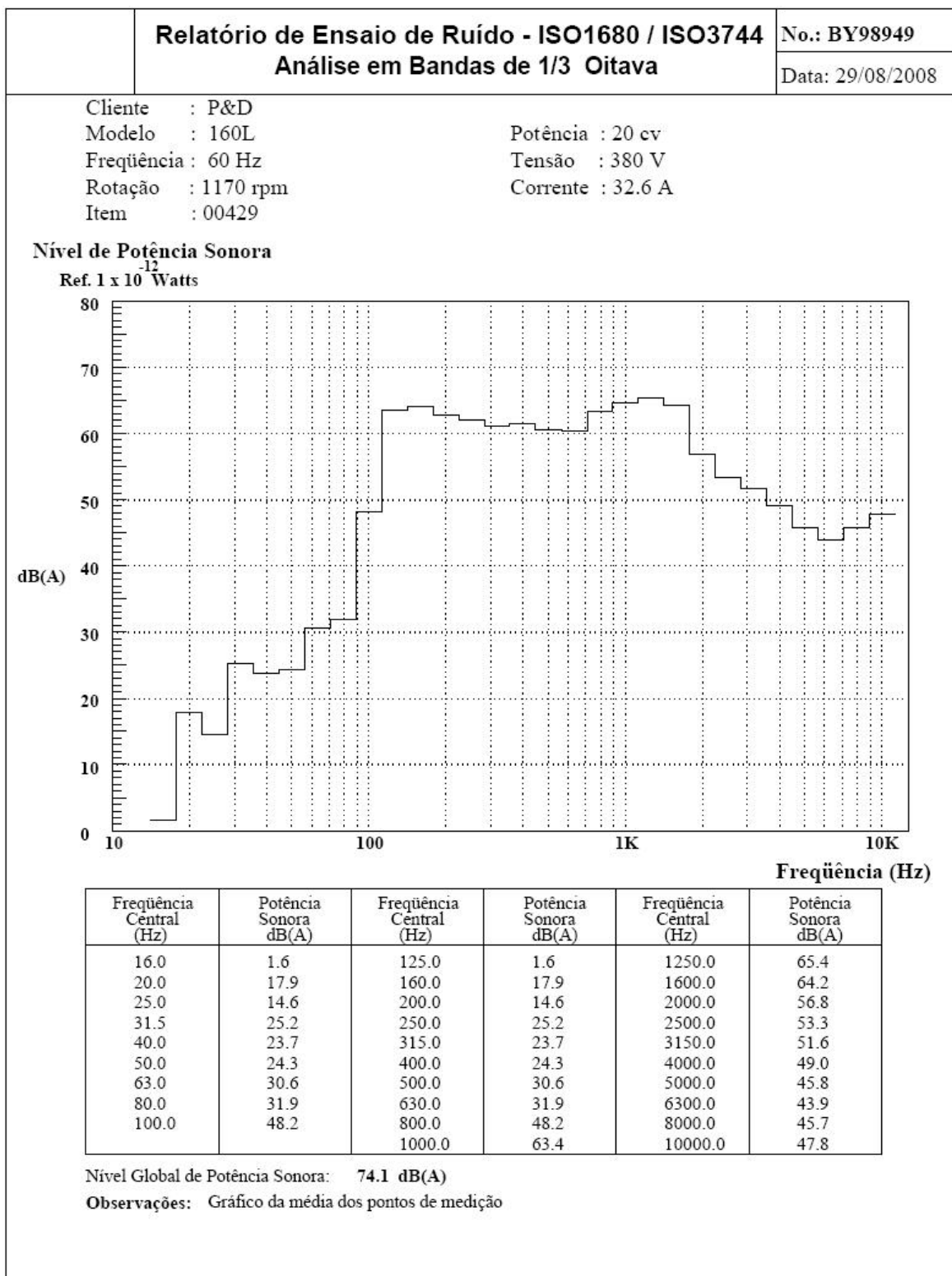


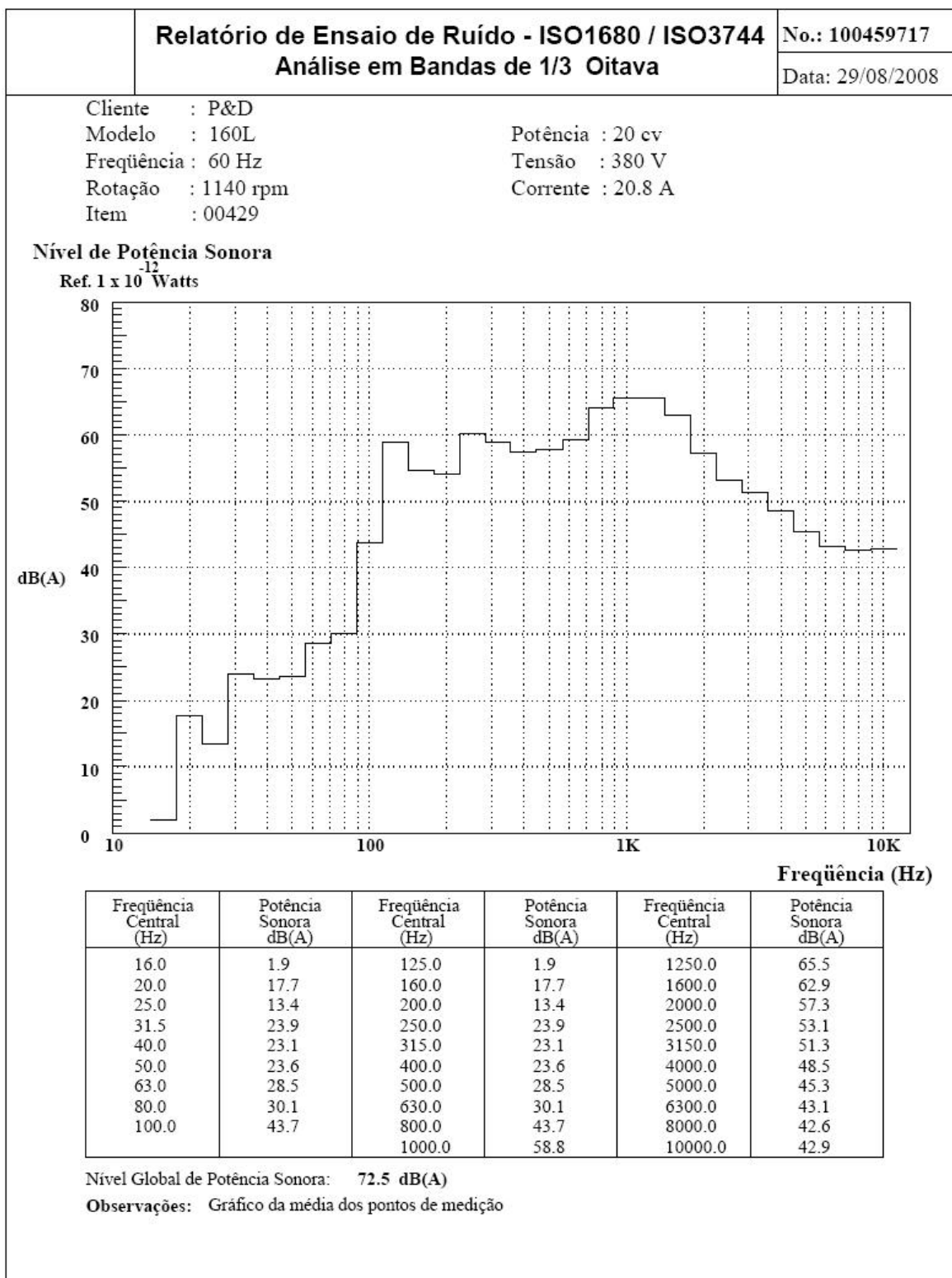


Motor de Indução Trifásico					Nº: BY98949-6	
					Data: 15/04/2008	
IDENTIFICAÇÃO						
Potência: 20 cv		Pol: 6 polos		Tensão: 380 V		
Frequência: 60 Hz		Rotação: 1170 rpm		Corrente: 32.6 A		
Grau Proteção: IP55		Isolamento: F		FS: 1.15		
Modelo: 160L 022007		Categoria: N		Item: 00429		
Cod. Vendas: -		Dt. Ensaio: 16/04/2007				
EB: 6991.4943						
		NBR 5383	IEC 34-2	CSA C390	D. Placa	TAB. VALORES
N O M I N A L	Ia (A)	31.42	31.46	31.39	0.00	32.59
	Pa (W)	16453.77	16477.94	16433.63		
	Cos Ø	0.796	0.796	0.796	0.00	0.780
	N (%)	89.46	89.33	89.57	0.00	89.60
	Pj1 (W)	758.96	757.09	757.41		
	Pj2 (W)	371.24	378.07	370.90		
	Ps (W)	63.17	82.39	45.82		
	Ptot (W)	1733.77	1757.94	1713.63		
RPM	1171	1170	1171	0.00	1170	
5 0 %	Ia (A)	21.09	21.12	21.08		
	Cos Ø	0.599	0.600	0.598		0.600
	N (%)	88.52	88.21	88.56		89.30
	RPM	1187	1186	1186		
7 5 %	Ia (A)	25.76	25.80	25.75		
	Cos Ø	0.723	0.723	0.722		0.720
	N (%)	89.75	89.52	89.82	0.00	89.60
	RPM	1179	1179	1179		
1 2 5 %	Ia (A)	38.07	38.08	38.01		
	Cos Ø	0.831	0.831	0.830		
	N (%)	88.58	88.54	88.72		
	RPM	1162	1161	1162		
T E M P E R	Desv. I Max.(%)	0.22		380	Pab (kW)	76.07
	RPM Inicio	1170		16.07	kVA/cv	7.14
	RPM fim	1170		719.90	Cp/Cn	2.66
	Rquente (20°C)	0.49334		49.75	Cmax/Cn	3.00
	T. Amb.	30.40			Ip/In	6.65
	DT. Mancal	-30.40		490.65	Ip (A)	216.89
	DT. Carc.	50.80		0.068	R1 (Ohm)	0.513500
	DT. Bobina	74.08		179.50	R2 (Ohm)	0.564590
	CTA	0.00		0.38552	X1+X2(Ohm)	1.381108
Características do Ensaio		Gama : 0.9082		Correção do Dinamômetro : -0.015702		

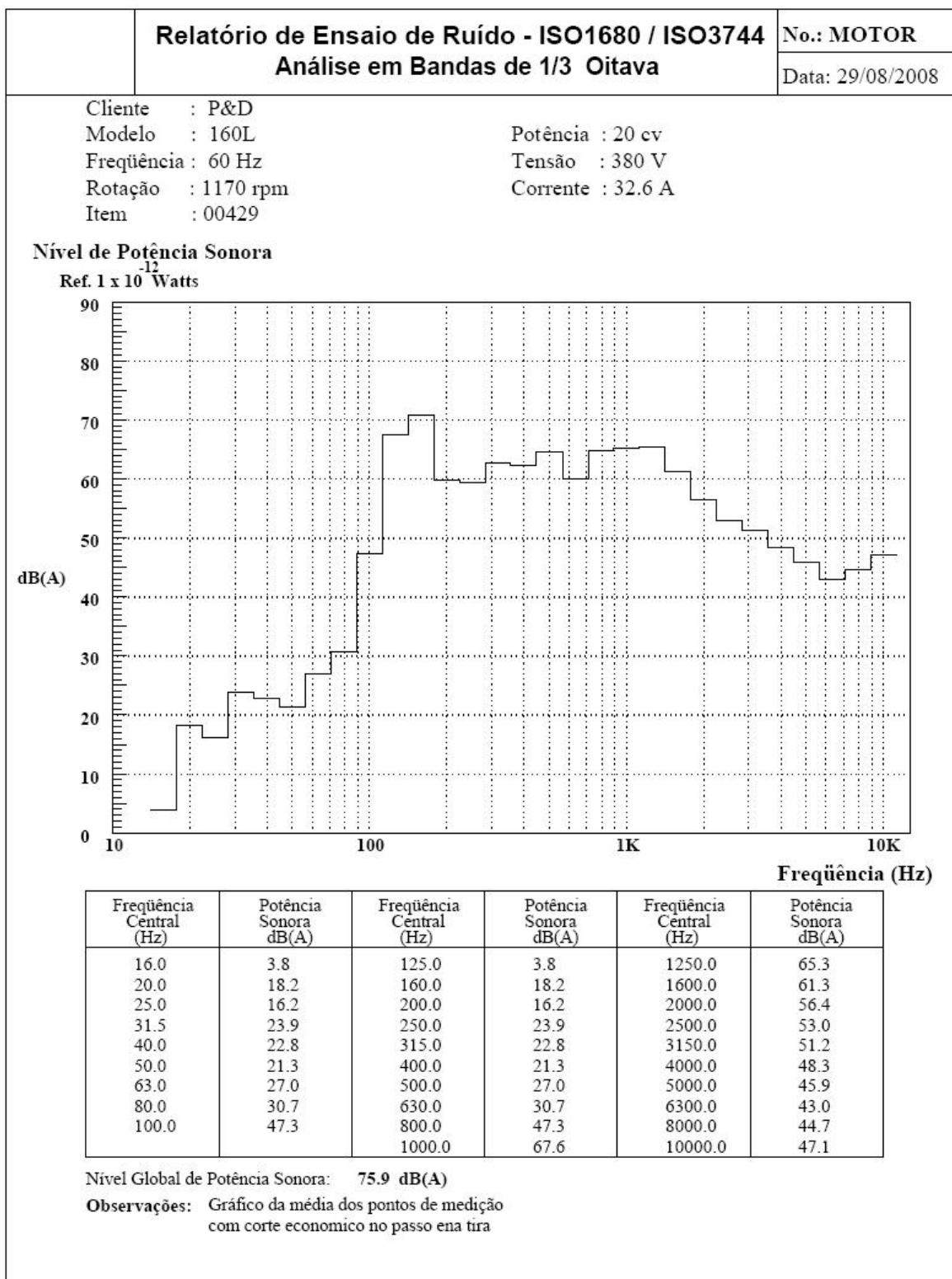
Motor de Indução Trifásico					Nº: BY98949-7	
					Data: 15/04/2008	
IDENTIFICAÇÃO						
Potência: 20 cv			Pol: 6 polos		Tensão: 380 V	
Frequência: 60 Hz			Rotação: 1170 rpm		Corrente: 32.6 A	
Grau Proteção: IP55			Isolamento: F		FS: 1.15	
Modelo: 160L 022007			Categoria: N		Item: 00429	
Cod. Vendas: -			Dt. Ensaio: 02/04/2007			
EB: 6991.4943						
		NBR 5383	IEC 34-2	CSA C390	D. Placa	TAB. VALORES
N O M I N A L	Ia (A)	31.47	31.48	31.44	0.00	32.59
	Pa (W)	16448.49	16458.88	16429.37		
	Cos Ø	0.798	0.798	0.798	0.00	0.780
	N (%)	89.49	89.44	89.60	0.00	89.60
	Pj1 (W)	750.32	746.81	748.88		
	Pj2 (W)	368.23	373.94	367.95		
	Ps (W)	74.10	82.29	58.15		
	Ptot (W)	1728.49	1738.88	1709.37		
RPM	1171	1171	1171	0.00	1170	
5 0 %	Ia (A)	21.06	21.10	21.06		
	Cos Ø	0.601	0.602	0.601		0.600
	N (%)	88.56	88.29	88.60		89.30
	RPM	1186	1186	1186		
7 5 %	Ia (A)	25.81	25.85	25.80		
	Cos Ø	0.726	0.726	0.725	0.00	0.720
	N (%)	89.75	89.58	89.82		89.60
	RPM	1179	1179	1179		
1 2 5 %	Ia (A)	38.03	38.00	37.98		
	Cos Ø	0.832	0.832	0.832		
	N (%)	88.66	88.72	88.80		
	RPM	1163	1162	1163		
T E M P E R	Desv. I Max.(%)	1.27		380	Pab (kW)	76.07
	RPM Inicio	1178		16.00	kVA/cv	7.14
	RPM fim	1170		721.50	Cp/Cn	2.66
	Rquente (20°C)	0.48617		45.51	Cmax/Cn	3.02
	T. Amb.	31.90		490.33	Ip/In	6.65
	DT. Mancal	-31.90		0.069	Ip (A)	216.89
	DT. Carc.	46.40		185.66	R1 (Ohm)	0.508900
	DT. Bobina	67.85		0.38748	R2 (Ohm)	0.569190
	CTA	0.00			X1+X2(Ohm)	1.381108
Características do Ensaio		Gama : 0.9417		Correção do Dinamômetro : -0.007705		

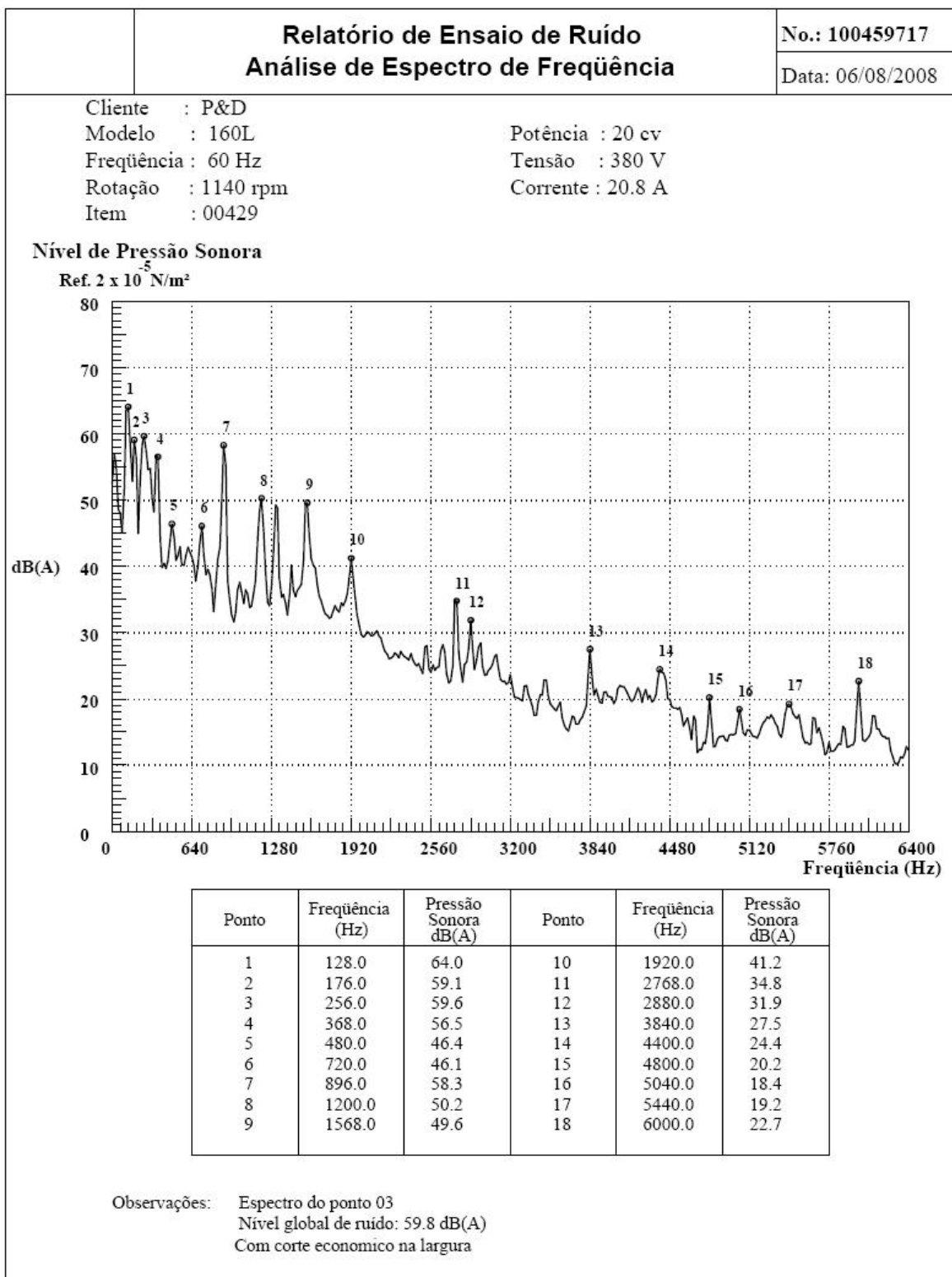
## **ANEXO 2 – ENSAIOS DE RUÍDO**

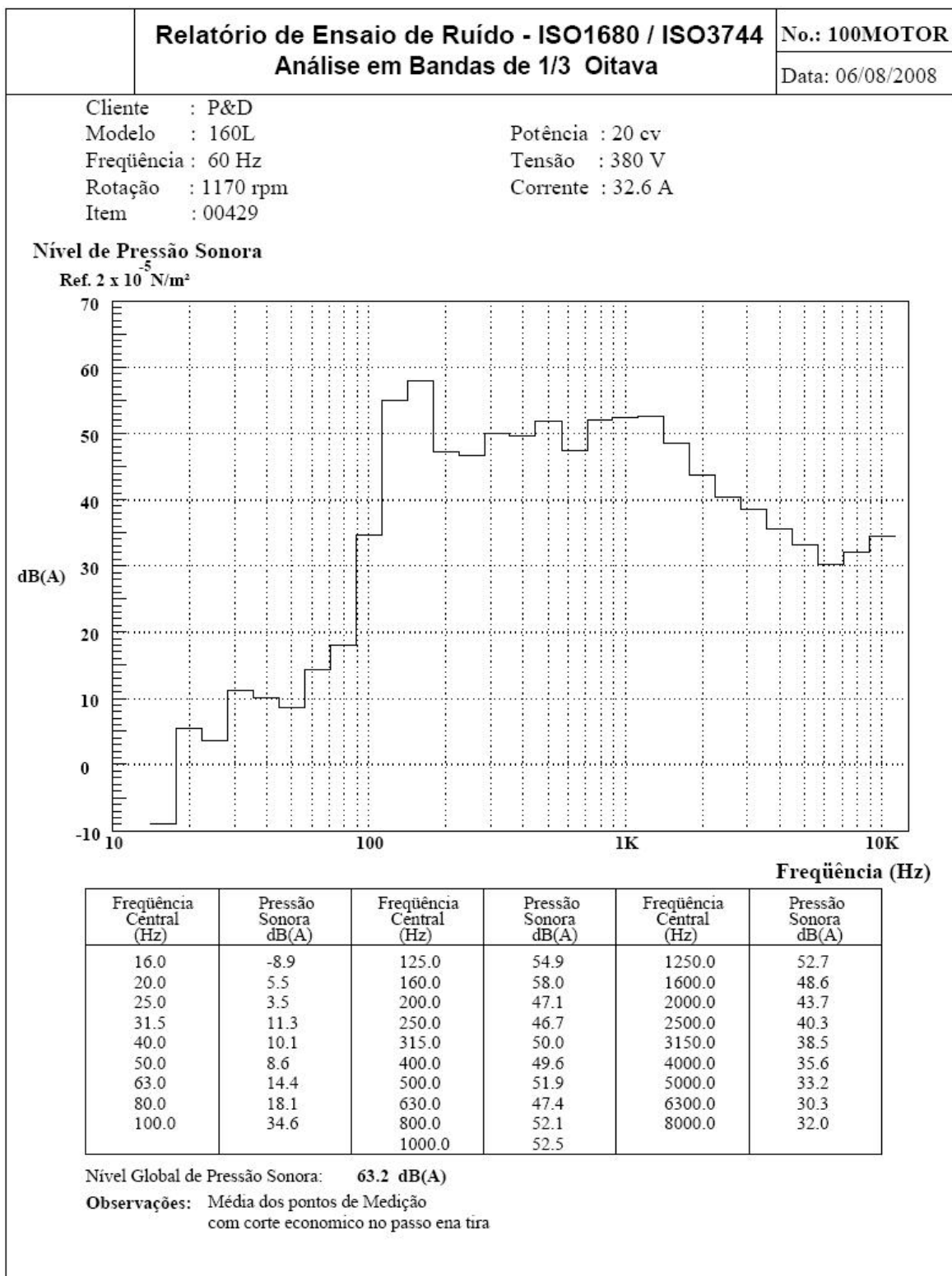


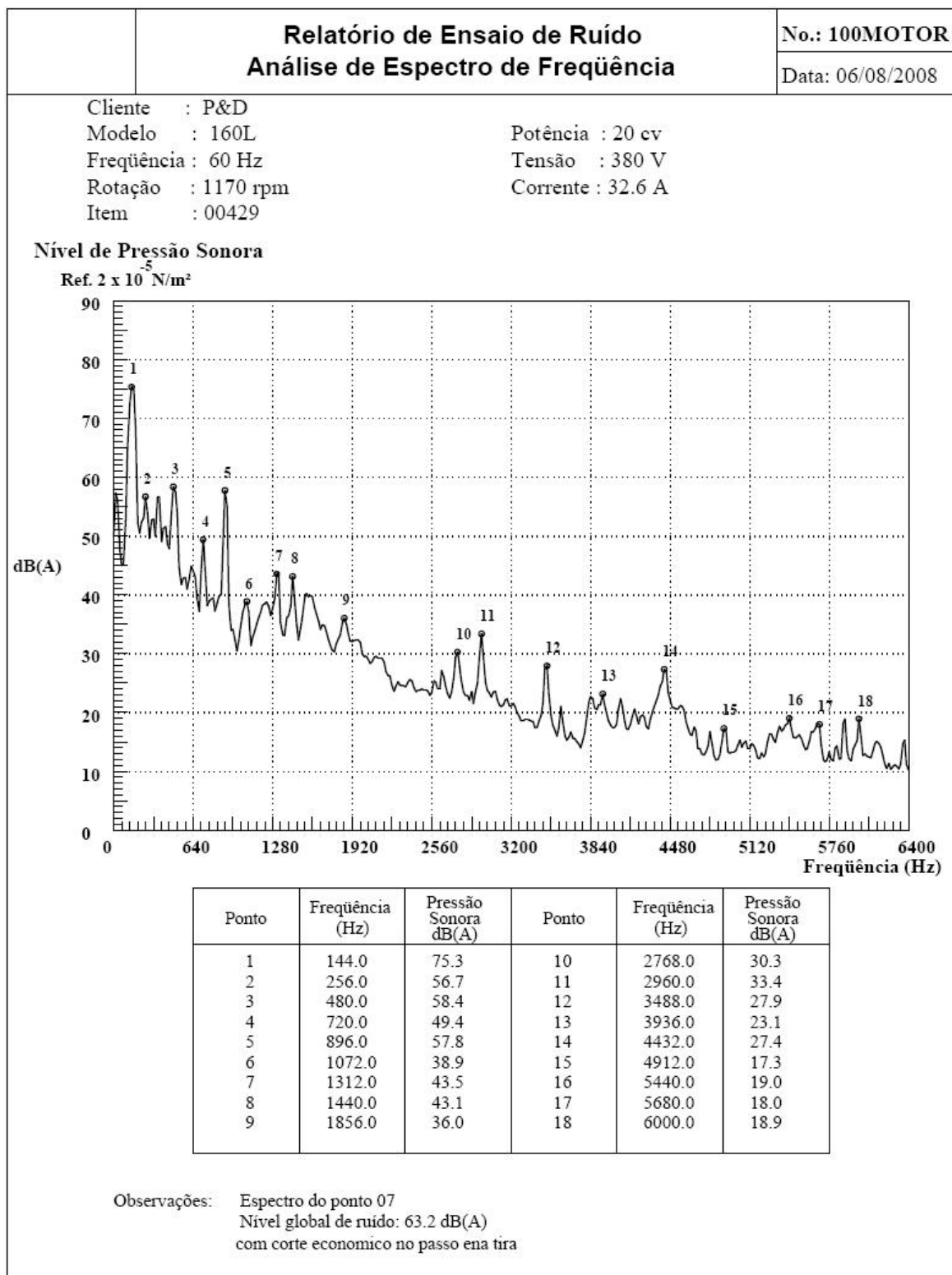












## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Norma Técnica TBG-0338E, Determinação da largura da tira para estampos, WEG Equipamentos Elétricos S/A - Motores, Jaraguá do Sul, 1997.
- [2] PACHECO, J.E. *M2E - Programa analítico para cálculo de máquinas elétricas em dois eixos*, WEG Equipamentos Elétricos S/A - Motores - Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento, Jaraguá do Sul, 2007.
- [3] BASTOS, J.P.A., SADOWSKI N. *Software EFCAD - Electromagnetic Fields Computer Aided Design*, GRUCAD/UFSC, Florianópolis, versão 2007.
- [4] NAU, S.L. *Desenvolvimento de um método de cálculo para determinação do ruído acústico de origem magnética gerado por motores de indução trifásicos*, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2000.
- [5] NAU, S.L. *Análise da influência da excentricidade do rotor sobre o ruído acústico de origem magnética gerado por motores de indução trifásicos*, Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, 2007.
- [6] SILVA, H.P.; VERARDI, M.; SANTOS, H.L.V. *Verificações Mecânicas em Máquinas Elétricas Girantes Sujeitas a Excitações Dinâmicas de Impacto e Vibração Provenientes da Base de Fixação*. WEG Indústrias - Divisão Motores - Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento TT2006-03, Jaraguá do Sul, 2006.
- [7] SCHUTZLER E.L.; STEINUIZ E.; MICHALAK I.K.; SOUZA J.F.; FRANZ N. *Manual para Projetos de Estampos Progressivos das Chapas Rotor/Estator*. WEG Indústrias - Divisão Motores - Seção de Projetos TT1998-02, Jaraguá do Sul, 1998.
- [8] ALGER, Philip L. *Induction Machines - Their Behavior and Uses*, second edition, New York: Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., 1970.
- [9] KOSTENKO, M.; PIOTROVSKI, L. *Máquinas Eléctricas - Máquinas de Corrente Alternada*, volume II, Porto: Edições Lopes da Silva, 1979.
- [10] FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY JR, C.; KUSKO, A. *Máquinas Elétricas*. Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1975.
- [11] MARTÍN, J.C. *Cálculo Industrial de Máquinas Elétricas*, volume I e II, Boixareu Editores, 1982.
- [12] CONTIN, M.C. *Perdas no Ferro*. WEG Indústrias – Divisão Motores - Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento TT1983-006. Jaraguá do Sul, 1983.
- [13] BASTOS, J.P.A. *Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática*, Editora da UFSC, Florianópolis, 2004.
- [14] Manual WEG de motores elétricos, WEG Equipamentos Elétricos S/A - Motores, Jaraguá do Sul, 2007.

- [15] PRATA A.T. *Apostila Transferência de Calor*, Mestrado Profissionalizante em Máquinas Elétricas Girantes UFSC/WEG, Florianópolis, 2005.
- [16] SILVA H.P., *Apostila Fundamentos de Acústica*, WEG Indústrias - Divisão Motores - Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento, Jaraguá do Sul, 2003.
- [17] VOGT, M.H.; PEREIRA, M.A.; CARVALHO, R.B. *Corte econômico em chapas para motores trifásicos de indução*, Monografia de Especialização em Máquinas Elétricas Girantes, UFSC, Jaraguá do Sul, 2001.